



Escuela Técnica Superior de Ingenierías Industrial y
Aeronáutica de Terrassa (ETSEIAT)

Grado en Ingeniería en Tecnologías Aeroespaciales
(GrETA)

Estudio de un oscilador fluídico mediante
mecánica de fluidos computacional

Memoria

Autor: Manuel Sarmiento Calderó

Director: David del Campo Sud

Co-Directora: Vanessa del Campo Gatell

9 de enero de 2015

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado en la realización de este trabajo. A mi hermano por echarme una mano con la edición de las fotos, a mi prima por hacer lo propio con los videos, y especialmente a Josep Maria Bergadà Granyó, por permitirnos usar el oscilador fluídico con el que él realizo un estudio en la Technische Universitat Berlin, y sobre todo por sus consejos.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo	1
1.2. Alcance	1
1.3. Requerimientos	2
1.4. Justificación	2
1.5. Planificación del proyecto	3
2. Osciladores fluídicos y sus aplicaciones	6
3. El oscilador fluídico	11
3.1. Caracterización	11
3.2. Funcionamiento	12
4. Estudios previos	15
5. Cambios de geometría	22
6. Estudio computacional	31
6.1. Diseño de la geometría y mallado	31
6.2. Simulaciones	33
7. Resultados	38
8. Conclusiones	79
9. Presupuesto	82
10. Impacto medioambiental	83
11. Trabajo futuro	84

Índice de figuras

1.1. Duración de las tareas realizadas durante el trabajo	4
1.2. Diagrama de Gantt	5
2.1. Oscilador fluídico activo. Hobbs [6]	6
2.2. Oscilador fluídico pasivo. Adaptado de Raman [7]	7
2.3. Posición de los osciladores fluídicos en el ala. Raghu [13]	9
2.4. Distribución de los osciladores lo largo del eje. Raghu [13]	9
3.1. Partes del oscilador fluídico	12
3.2. Distribución del flujo para $\phi = 0^\circ$	13
3.3. Distribución del flujo para $\phi = 30^\circ$	13
3.4. Distribución del flujo para $\phi = 90^\circ$	14
3.5. Distribución del flujo para $\phi = 180^\circ$	14
4.1. Valores del Reynolds frente a la frecuencia experimental de Bobusch	16
4.2. Valores del Reynolds frente a las frecuencias experimental y numérica de Bobusch	17
4.3. Mallado creado por Arozarena	18
4.4. Detalle del mallado creado por Arozarena	18
4.5. Valores del Reynolds frente a la frecuencia de Arozarena	19
4.6. Valores del Reynolds frente a las frecuencias de Bobusch y Arozarena	20
5.1. Cambios geométricos realizados	23
5.2. Puntos relevantes del oscilador fluídico	23
5.3. Puntos desplazados en la modificación de la amplitud de la garganta de entrada a la cámara	25

5.4. Puntos desplazados en la modificación del ángulo de entrada a la cámara	26
5.5. Puntos desplazados en la modificación de la garganta de salida de la cámara	28
5.6. Puntos desplazados en la modificación del ángulo de salida de la cámara	30
6.1. Desarrollo en bloques de Arozarena [5]	32
7.1. Evolución del perfil de velocidades del oscilador original	39
7.2. Flujo másico a través de cada apertura del oscilador original	40
7.3. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 5.25 mm. No hay oscilaciones	42
7.4. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.75 mm. La frecuencia es 74.77 Hz.	42
7.5. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.50 mm. La frecuencia es 52.98 Hz.	43
7.6. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.25 mm. La frecuencia es 48.83 Hz.	43
7.7. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.00 mm. La frecuencia es 46.24 Hz.	44
7.8. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 3.75 mm. La frecuencia es 44.45 Hz.	44
7.9. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 3.50 mm. La frecuencia es 45.57 Hz.	45
7.10. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 3.00 mm. La frecuencia es 50.01 Hz.	45
7.11. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 2.75 mm. La frecuencia es 58.41 Hz.	46
7.12. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 2.50 mm. No hay oscilaciones.	46
7.13. Perfil de velocidades inicial para una amplitud de la garganta de 2.25 mm	47
7.14. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 2.25 mm. No hay oscilaciones.	47

7.15. Perfil de velocidades inicial para una amplitud de la garganta de 1.75 mm	48
7.16. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 1.75 mm. No hay oscilaciones.	48
7.17. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 1.25 mm. No hay oscilaciones.	49
7.18. Frecuencias de la modificación de la garganta de entrada a la cámara	51
7.19. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 47.26°. La frecuencia es 47.54 Hz.	53
7.20. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 42.26°. La frecuencia es 47.07 Hz.	53
7.21. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 39.76°. La frecuencia es 47.25 Hz.	54
7.22. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 37.26°. La frecuencia es 46.99 Hz.	54
7.23. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 34.76°. La frecuencia es 47.34 Hz.	55
7.24. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 29.76°. La frecuencia es 46.81 Hz.	55
7.25. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 27.26°. La frecuencia es 46.38 Hz.	56
7.26. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 24.76°. La frecuencia es 46.39 Hz.	56
7.27. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 22.26°. La frecuencia es 47.13 Hz.	57
7.28. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 17.26°. La frecuencia es 46.62 Hz.	57
7.29. Frecuencias de la modificación del ángulo de entrada a la cámara	59
7.30. Frecuencias de la modificación del ángulo de entrada a la cámara	60
7.31. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 5.40 mm. La frecuencia es 47.44 Hz.	62
7.32. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 5.15 mm. La frecuencia es 47.31 Hz.	62

7.33. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.90 mm. La frecuencia es 47.18 Hz.	63
7.34. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.65 mm. La frecuencia es 46.33 Hz.	63
7.35. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.40 mm. La frecuencia es 46.99 Hz.	64
7.36. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.15 mm. La frecuencia es 46.78 Hz.	64
7.37. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 3.90 mm. La frecuencia es 47.30 Hz.	65
7.38. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 2.90 mm. La frecuencia es 47.21 Hz.	65
7.39. Perfil de velocidades inicial para una amplitud de la garganta de 2.40 mm	66
7.40. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 2.40 mm. La frecuencia es 47.28 Hz.	66
7.41. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 1.90 mm. La frecuencia es 46.02 Hz.	67
7.42. Perfil de velocidades inicial para una amplitud de la garganta de 1.40 mm	67
7.43. Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 1.40 mm. La frecuencia es 51.54 Hz.	68
7.44. Frecuencias de la modificación de la garganta de salida de la cámara	70
7.45. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 54.00°. La frecuencia es 42.47 Hz.	72
7.46. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 49.00°. La frecuencia es 44.09 Hz.	72
7.47. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 44.00°. La frecuencia es 44.71 Hz.	73
7.48. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 39.00°. La frecuencia es 45.59 Hz.	73
7.49. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 29.00°. La frecuencia es 47.35 Hz.	74

7.50. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 24.00°. La frecuencia es 48.30 Hz.	74
7.51. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 19.00°. La frecuencia es 49.62 Hz.	75
7.52. Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 14.00°. La frecuencia es 50.55 Hz.	75
7.53. Frecuencias de la modificación del ángulo de salida de la cámara de mezclado	77
7.54. Frecuencias de la modificación del ángulo de salida de la cámara de mezclado	78

Índice de tablas

4.1. Relaciones de Reynodls y frecuencias. Bobusch [2] [3]	16
4.2. Relaciones de Reynodls y frecuencias. Arozarena [5]	20
5.1. Modificaciones de la garganta de entrada a la cámara	25
5.2. Modificaciones del ángulo de entrada a la cámara	27
5.3. Modificaciones de la garganta de salida de la cámara	29
5.4. Modificaciones del ángulo de salida de la cámara	30
6.1. Características de las simulaciones	37
7.1. Modificaciones de la garganta de entrada a la cámara	41
7.2. Frecuencias de la modificación de la garganta de entrada a la cámara	50
7.3. Modificaciones del ángulo de entrada a la cámara	52
7.4. Frecuencias de la modificación del ángulo de entrada a la cámara	58
7.5. Modificaciones de la garganta de salida de la cámara	61
7.6. Frecuencias de la modificación de la garganta de salida de la cámara	69
7.7. Modificaciones del ángulo de salida de la cámara	71
7.8. Frecuencias de la modificación del ángulo de salida de la cámara de mezclado	76
9.1. Presupuestos del estudio detallados	82

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivo

El objetivo del trabajo final de grado es estudiar el comportamiento de un oscilador fluídico frente a cambios de geometría.

1.2. Alcance

Para la realización de este proyecto, ha sido necesario realizar diversas tareas, que se pueden clasificar en dos grupos, uno que engloba las tareas de aprendizaje, y otro constituido por tareas de desarrollo autónomo.

Dentro de las tareas de aprendizaje se encuentran:

- Aprendizaje, estudio y uso de los programas empleados durante la realización del TFG, principalmente ANSYS Icem, ANSYS Fluent, pero también en menor medida Matlab y Microsoft Excel.
- Estudio y comprensión del estado del arte de los osciladores fluídicos.
- Estudio de los experimentos y estudios realizados con anterioridad con el oscilador fluídico, tanto los llevados a cabo en la Technische Universitat Berlin, como el proyecto final de carrera de Mikel Ruiz Arozarena.

En cuanto al segundo grupo de tareas, las de desarrollo autónomo, son las siguientes:

- Modificaciones de la geometría del oscilador fluídico atendiendo a diversas variables.

- Estudio de la frecuencia, y otras características del flujo en la nueva geometría, para determinadas condiciones de entrada.
- Se deberá entregar una memoria con un análisis de la variación de las características del flujo, principalmente la frecuencia, en función del parámetro geométrico modificado.

1.3. Requerimientos

Los requerimientos propios de este trabajo final de grado consisten en reproducir y simular el oscilador fluídico estudiado en la Technische Universitat Berlin, realizar modificaciones geométricas sobre el mismo, simularlas, y extraer conclusiones de ellas.

1.4. Justificación

La investigación entendida como una actividad orientada a la obtención de nuevos conocimientos ha sido el gran motor del desarrollo en el último siglo y medio. Es por este motivo por el cual se debería seguir invirtiendo en ella, con el fin de obtener nuevos frutos que permitan descubrir innovadoras e interesantes aplicaciones.

Uno de estos frutos que se obtuvieron hace apenas 50 años [1] fueron los osciladores fluídicos, unos dispositivos que se basan de una serie de conductos hidráulicos y del efecto Coanda [2] [3] para conseguir transformar un flujo estacionario en uno pulsante, caracterizado por una frecuencia de oscilación.

Actualmente están siendo ensayados principalmente tanto en Alemania, concretamente en Berlín, Bobusch [2] [3], como en Estados Unidos, Gokoglu [4]. Actualmente se están realizando numerosos experimentos con ellos, pero debido a su corta existencia, y a que todavía no se han estudiado ni se ha experimentado con ellos en profundidad se desconoce el alcance que podrían llegar a tener.

Aun así, presentan buenas características, como son la ausencia de partes móviles, que reduce los costes y disminuye el riesgo de fallo, su simplicidad de diseño, el bajo mantenimiento que requieren, el hecho de que no requiere de energía eléctrica para su funcionamiento, el amplio rango de condiciones

bajo las que pueden operar o la necesidad de un flujo másico muy pequeño. Es por eso que una vez superadas las desventajas de estos dispositivos, es decir, ser capaz de conseguir o aportar las condiciones de entrada para conseguir las condiciones de salida deseadas, las buenas propiedades intrínsecas de los osciladores fluídicos le proporcionan ventajas cruciales frente a otros mecanismos de control de flujo.

El desarrollo de este trabajo continúa el proyecto final de carrera de Mikel Ruiz Arozarena [5] en el que lleva a cabo un estudio numérico de un oscilador fluídico. A su vez, este proyecto final de carrera está basado en un estudio experimental publicado en 2013, realizado en la Technische Universitat Berlin por los investigadores B.C Bobusch et al. [2] [3] los cuales construyeron el oscilador en cuestión y llevaron a cabo un estudio experimental.

En el presente estudio se pretende ampliar el conocimiento de este oscilador fluídico, mediante métodos numéricos. Se realizarán pequeños cambios geométricos al oscilador mencionado anteriormente, con el fin de observar cómo varía la frecuencia de salida. De esta forma, se podrá conocer la respuesta del oscilador frente a cambios de geometría sin necesidad de construir ningún prototipo.

1.5. Planificación del proyecto

La elaboración de este trabajo está dividida en diferentes tareas, que se detallan a continuación.

- La tarea más importante de todas ha sido la de documentarse, y se ha llevado a cabo durante todo el tiempo que ha durado el trabajo.
- También ha sido imprescindible aprender a usar los dos programas, hasta ahora desconocidos para el estudiante, con los que se ha trabajado: ANSYS fluent y ANSYS ICEM.
- Se empezó a redactar el TFG tan pronto como fue posible, es decir, una vez empezaron las simulaciones y fueron obteniendo resultados.
- Se modificó la geometría, se generaron las mallas, se realizaron las simulaciones y se analizaron los resultados de manera simultánea. Este proceso fue repetido hasta 42 veces.

- Una vez obtenidos todos los resultados y análisis de las simulaciones, el tiempo restante se dedicó íntegramente a la redacción, corrección y revisión del trabajo.
- Después de entregar la versión preliminar, el tiempo restante fue empleado en corregir errores y modificar la redacción del TFG

Las tareas, con su fecha de inicio y final se encuentran en la tabla 1.1

Nombre de la tarea	Fecha de inicio	Fecha de fin
Documentarse sobre los osciladores fluídicos	1/09/2014	9/12/2014
Aprender a usar el entorno Fluent	1/09/2014	2/10/2014
Aprender a usar el entorno icem	15/09/2014	2/10/2014
Redactar el Trabajo Final de Grado	3/10/2014	9/12/2014
Generar geometrías	3/10/2014	23/11/2014
Generar mallas	6/10/2014	26/11/2014
Realizar simulaciones	9/10/2014	29/11/2014
Analizar resultados	12/10/2014	4/12/2014
Corregir y revisar el Trabajo final de grado	30/11/2014	9/12/2014
Corrección de errores	10/12/2014	8/01/2015

Figura 1.1: Duración de las tareas realizadas durante el trabajo

La evolución temporal de estas tareas se puede ver en el diagrama de Gantt, figura 1.2.

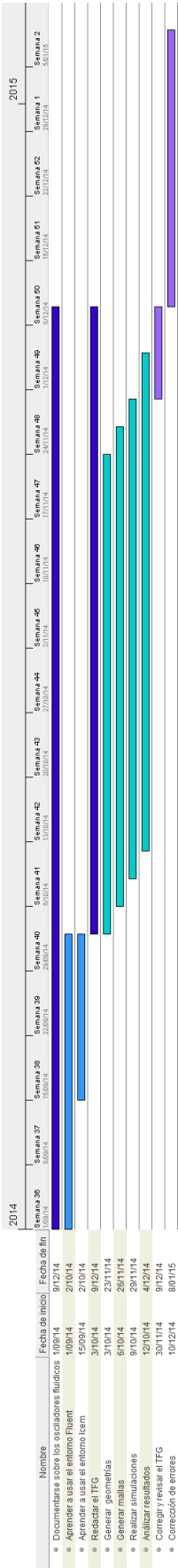


Figura 1.2: Diagrama de Gantt

Capítulo 2

Osciladores fluídicos y sus aplicaciones

Un oscilador fluídico se basa en la biestabilidad entre dos configuraciones de un flujo de fluido dentro de la cámara de un dispositivo especialmente diseñado para ello. La transición entre estas dos configuraciones puede conseguirse principalmente de dos maneras:

- Influyendo activamente en el cambio de configuración produciendo una interacción entre el flujo principal y un flujo auxiliar que obligue al primero a desplazarse hacia la segunda configuración estable. Como se muestra en la figura 2.1, la interacción ejercida desde la izquierda desplaza el flujo (Propulsion Jet) hacia la derecha y viceversa.

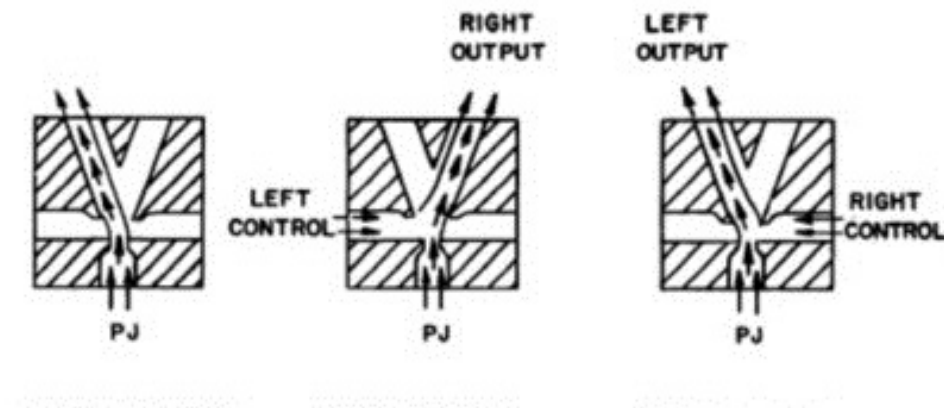


Figura 2.1: Oscilador fluídico activo. Hobbs [6]

- O de manera pasiva, dejando que sea el mismo flujo el que se regule, mediante canales de realimentación, aprovechando el potencial del efecto Coanda. En este segundo caso el dispositivo es bastante más complejo ya que consta de una cámara de mezclado y de dos canales de realimentación. De esta forma, la frecuencia de las oscilaciones no se puede controlar de manera directa como en el caso anterior, pero en cambio no depende de una acción exterior para oscilar. En la figura 2.2 se muestra un oscilador de este tipo.

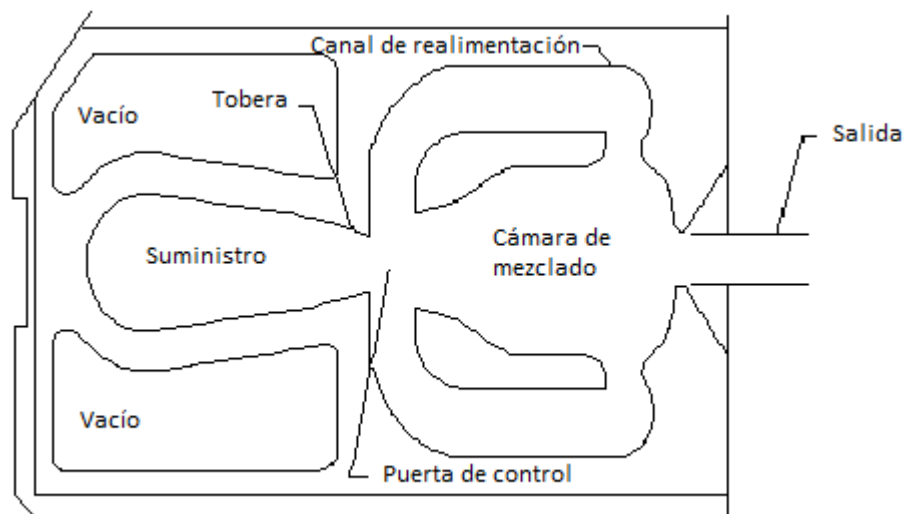


Figura 2.2: Oscilador fluídico pasivo. Adaptado de Raman [7]

Cabe mencionar los osciladores pueden tener uno, o más conductos de salida diferentes (outlets). Según la aplicación y las necesidades de ésta se puede requerir que la oscilación del flujo sea continua o separarla en dos o incluso más salidas. Por ejemplo, en el caso del líquido limpiaparabrisas lo ideal es que el oscilador disponga de una sola salida, de manera que el fluido barra la mayor superficie posible. Sin embargo, el oscilador que se estudiará más adelante tiene dos outlets diferenciados.

Estos dispositivos se empezaron a diseñar en los años 60 con el objetivo de ser un dispositivo seguro y de confianza en el control de sistemas fluídicos. Para conseguirlo se usaron propiedades de los fluidos tan importantes como la transición de laminar a turbulento, vórtices, caídas de presión y el efecto Coanda. Al no involucrar partes móviles, se convirtieron en unos dispositivos muy robustos y fiables. Los amplificadores fluídicos biestables fueron unos de

los dispositivos entonces desarrollados, y los osciladores fluídicos se obtuvieron al incorporar los conductos de realimentación. Actualmente existen diversos diseños, algunos de los cuales ni siquiera disponen de estos conductos, y se basan en complejas inestabilidades del flujo para generar las oscilaciones [1].

A pesar de la complejidad de su funcionamiento y de las diferentes posibilidades que presentan, ya están siendo utilizados para aplicaciones básicas, como son los dispensadores de líquido limpiaparabrisas en los coches. Y se espera que en un futuro puedan tener muchas más, y más complejas aplicaciones en diferentes campos de la ciencia. Entre ellas cabe mencionar la supresión de las inestabilidades en la combustión, Poinot [8], la eliminación de los tonos producidos por la interacción flujo-cavidad, Raman [9], controlar la separación de la capa límite, Cerretelli [10], modificar la separación del flujo en perfiles aerodinámicos, Seele [11], reducir el drag en camiones, Seifert [12] y por otro lado, una de las posibles aplicaciones más relevantes en el campo de la aeronáutica que se espera que puedan tener es su utilización como dispositivo hipersustentador en las alas de los aviones, aumentando la sustentación y reduciendo la resistencia aerodinámica mediante un mayor control de la capa límite, llegando incluso a sustituir a los flaps. Una posible colocación de los osciladores fluídicos en un ala se muestra en las figuras 2.3 y 2.4:

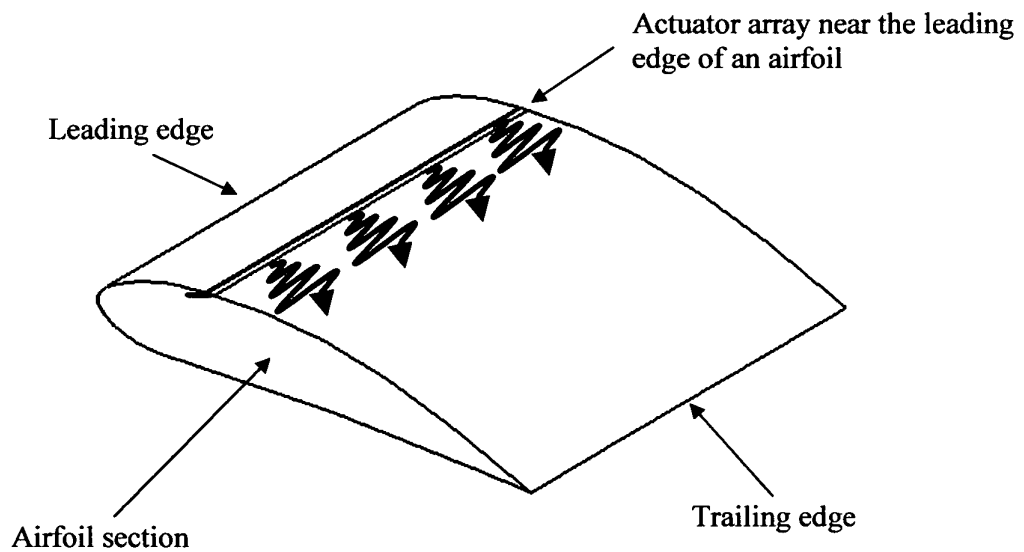


Figura 2.3: Posición de los osciladores fluídicos en el ala. Raghu [13]

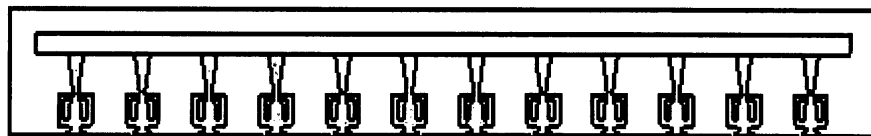


Figura 2.4: Distribución de los osciladores lo largo del eje. Raghu [13]

El inconveniente que presentan para esta aplicación es que su correcto funcionamiento depende de la presión de trabajo y en un vuelo esta varía según el régimen y la altitud del mismo. Por eso se trabaja en el control de la salida a través de mecanismos piezoeléctricos, que puedan adaptarla a las condiciones de vuelo.

Como se aprecia en las figuras anteriores, las dimensiones del dispositivo son extremadamente pequeñas, de apenas varios centímetros. Esta característica

facilita y mucho su implantación en diferentes aplicaciones, ya que apenas cambia la forma del elemento donde se incorpora.

Estos conocimientos generales sobre los osciladores fluídicos se podrán aplicar en el siguiente capítulo al estudio de un oscilador fluídico en concreto.

Capítulo 3

El oscilador fluídico

A partir de ahora, el trabajo se centrará en el estudio de un determinado oscilador fluídico, en el cual Mikel Ruiz Arozarena ha centrado su proyecto final de carrera, y ya ha sido estudiado por otros investigadores en la Technische Universitat Berlin.

3.1. Caracterización

Este oscilador tiene unas dimensiones bastante pequeñas, 9 centímetros de largo por 4 cm de ancho, y tan solo 1 cm de altura, siendo esta aún menor, 3 mm, en los conductos de entrada y salida. El dispositivo cuenta con una entrada de flujo o inlet (a), una cámara de mezclado (b), dos conductos de realimentación o feedback channels (c), y dos salidas de flujo o outlets (d), como se muestra en la figura 3.1. Así pues, en el oscilador se pueden distinguir tres zonas claramente diferenciadas:

- La entrada, que se extiende desde la apertura hasta la garganta de la cámara de mezclado. Es la zona más alargada, y esta pensada así para que el flujo entrante alcance una velocidad uniforme y constante en la dirección del eje axial del dispositivo, para que las condiciones en la cámara de mezclado varíen lo menos posible.
- La cámara de mezclado y los conductos de realimentación, zonas que se sitúa entre las dos gargantas del dispositivo, la de entrada y la de salida de la cámara. Aquí es donde tiene lugar el fenómeno que realmente caracteriza este dispositivo. Los conductos de realimentación conectan la

entrada y la salida de la cámara y son los verdaderos responsables de que el sistema oscile entre las dos configuraciones estables.

- La salida es la zona más corta, que comprende desde la garganta de salida de la cámara hasta la salida al exterior del flujo. Dispone de dos outlets, claramente separados por un desviador, entre los que el flujo de salida irá oscilando. En ellos en función del tiempo puede llegar a producirse flujo inverso, igual que en los conductos de realimentación.

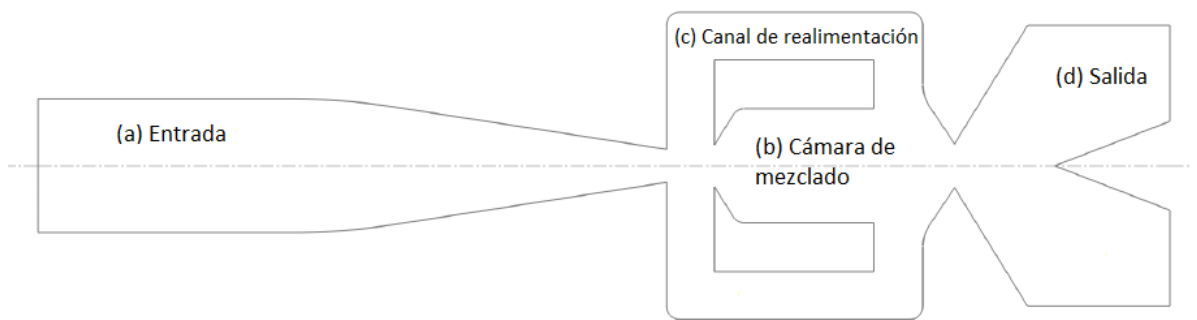


Figura 3.1: Partes del oscilador fluido

3.2. Funcionamiento

El funcionamiento del dispositivo de acuerdo a estudios numéricos y experimentales realizados anteriormente se puede dividir en distintas etapas, que se repiten de forma periódica, así pues se utiliza un ángulo de fase ϕ para identificarlas. La fase inicial se identifica con 0° y el ángulo de fase 180° se usa para referirse a su fase simétrica. De manera que el proceso se repite dos veces a lo largo de un periodo, por lo que solo se explicará el proceso del flujo desde $\phi = 0^\circ$ hasta $\phi = 180^\circ$.

Al inicio de un periodo, $\phi = 0^\circ$, figura 3.2, el chorro de flujo está completamente pegado a la pared inferior de la cámara. Inmediatamente después se forma una burbuja de recirculación entre el flujo principal y la pared de la cámara, a continuación de la cuña de entrada en la cámara. De esta forma, el chorro choca contra la cuña inferior de la segunda garganta, la de salida de la cámara, haciendo que parte del flujo salga de la cámara y otra se vea obligada a pasar a través del conducto de realimentación, aguas arriba.

Aguas abajo de la garganta de salida, el flujo principal sale a través del outlet superior, estando pegado a la pared del desviador de flujo. En el outlet inferior, se produce un fuerte vórtice, que transporta fluido aguas arriba, llegando incluso a alimentar al flujo principal. Esto hace que el oscilador sea especialmente sensible a las condiciones de salida de los outlets. Se cree que esta hipersensibilidad se puede aliviar estrechando los conductos de salida y ajustándolos más a la dirección del flujo principal, para impedir la formación del vórtice [2].

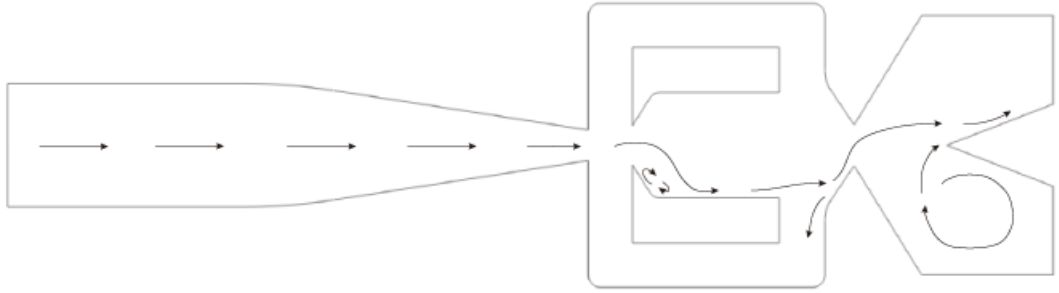


Figura 3.2: Distribución del flujo para $\phi = 0^\circ$

Aproximadamente desde $\phi = 30^\circ$ hasta $\phi = 90^\circ$, figura 3.3, el flujo que pasa a través el conducto de realimentación inferior vuelve a la cámara de mezclado entre el flujo principal y la cuña inferior de la garganta, alimentando la burbuja, haciéndola crecer y redirigiendo el flujo principal hacia la otra pared de la cámara.

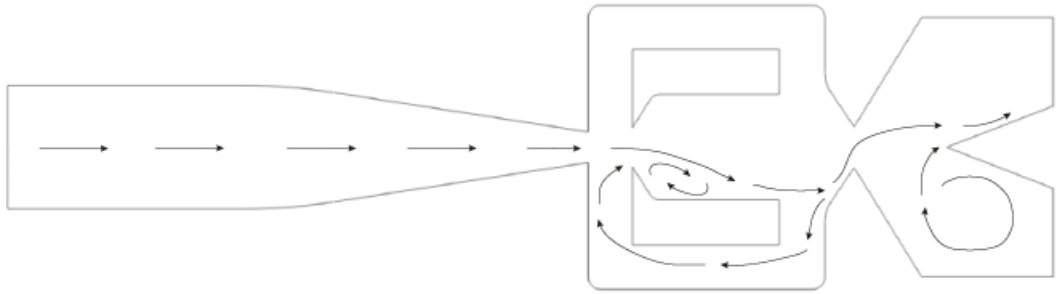


Figura 3.3: Distribución del flujo para $\phi = 30^\circ$

A partir de la fase $\phi = 90^\circ$ y hasta $\phi = 120^\circ$, figura 3.4, el vórtice del

outlet inferior se debilita y la burbuja de la cámara es arrastrada aguas abajo empujando el flujo principal hacia la mitad superior. El flujo sigue saliendo por el outlet superior, pero el ángulo con el que incide contra la pared del desviador es mucho mayor, haciendo que el flujo se separe de la pared.

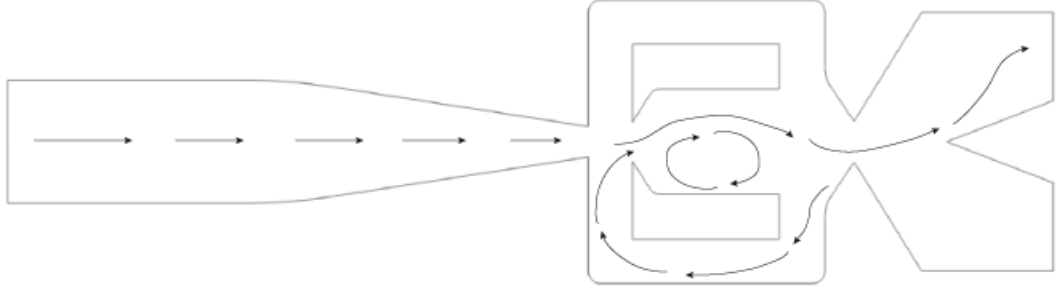


Figura 3.4: Distribución del flujo para $\phi = 90^\circ$

En $\phi = 150^\circ$, figura 3.5 el flujo consigue finalmente salir por el outlet inferior, y el flujo principal, debido al efecto Coanda, y a la zona de baja presión que allí se crea, consigue adaptarse a la pared superior, llegando así a la fase $\phi = 180^\circ$ de manera que se forma otra vez la burbuja de recirculación entre la pared y el flujo, y reiniciando así el proceso de manera simétrica.

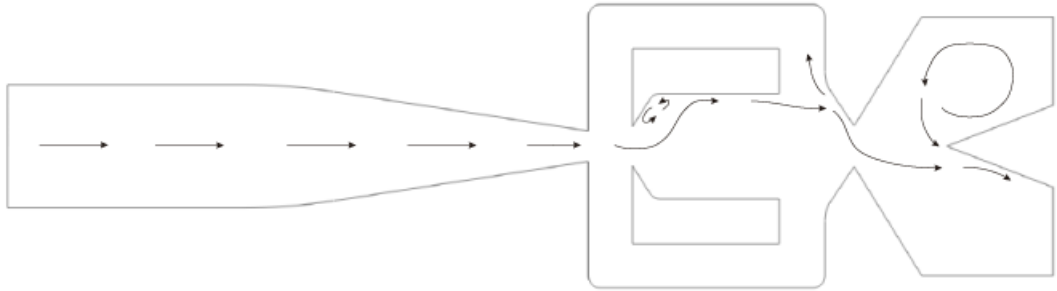


Figura 3.5: Distribución del flujo para $\phi = 180^\circ$

En el presente trabajo se pretende estudiar el comportamiento de la frecuencia de oscilación frente a diferentes cambios geométricos del oscilador, para unas condiciones exteriores y de entrada específicas. En el siguiente capítulo se detallan los cambios realizados y el motivo que impulso a realizar esos cambios y no otros.

Capítulo 4

Estudios previos

Para comprender el desarrollo de este trabajo es preciso primero conocer y comprender ciertos aspectos de los estudios en los que está basado.

En la Technische Universitat Berlin, se llevaron a cabo varios estudios, tanto experimentales, Bobusch [2], como numéricos, Bobusch [3] del mismo oscilador, que es el que aquí se estudiará. Durante el estudio experimental, debido a que usando aire como fluido de trabajo la frecuencia era extremadamente alta, y hacía casi imposible su medición, y a que Guyot en 2009 estableció que la frecuencia de los osciladores era independiente de la compresibilidad del fluido [14], se utilizó agua en su lugar, teniendo en cuenta que los resultados más tarde se podrían generalizar al uso de aire en el dispositivo, ya que para el mismo flujo másico, la frecuencia se ve reducida en dos órdenes de magnitud. Para realizar el experimento, se sumergió el oscilador en agua hasta una profundidad de 40 veces el diámetro de los outlets, y mediante una bomba se proveyó al inlet de la presión requerida.

Por eso, en el estudio numérico se usó también agua como fluido de trabajo, para poder corroborar que los resultados numéricos eran correctos y efectivamente, los resultados de los estudios numéricos y experimentales coinciden con bastante exactitud. Es necesario mencionar que durante el estudio experimental se obtuvieron hasta cuatro frecuencias para el mismo oscilador pero solo una de ellas era dominante, y las otras tres no eran prácticamente apreciables. Se simuló cuatro veces el mismo oscilador bajo diferentes condiciones de entrada. Así, para diferentes números de Reynolds, obtuvieron cuatro frecuencias diferentes. El Reynolds se calculó usando la velocidad (v_g) y la longitud característica del diámetro del final del conducto de entrada (d_g). De manera que

$$Re = \rho_{agua} v_g d_g / \mu_{agua}.$$

Los datos del Reynolds y la frecuencia del estudio experimental y del estudio numérico se presentan en la tabla 4.1.

Reynolds	Frecuencia experimental [Hz]	Frecuencia numérica [Hz]
8711	12,9	12,3
11152	15,4	15,1
13593	18,7	17,9
16034	21,5	20,7

Tabla 4.1: Relaciones de Reynolds y frecuencias. Bobusch [2] [3]

Y como en esos estudios se resalta, existe una fuerte relación lineal entre ambos parámetros. Considerando únicamente los valores experimentales se comprueba la relación lineal entre Reynolds y frecuencia.

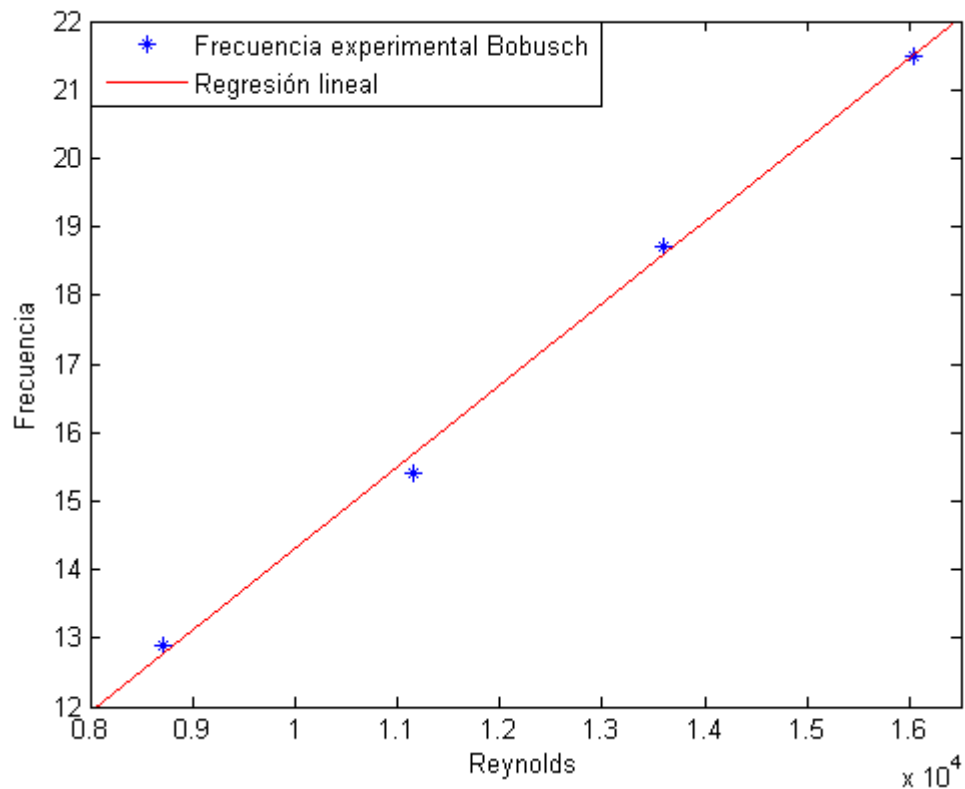


Figura 4.1: Valores del Reynolds frente a la frecuencia experimental de Bobusch

Siendo la ecuación de la recta $y = 0,0011921x + 2,3753$ y el valor del

coeficiente de determinación $R^2 = 0,9975$, lo que prueba que efectivamente, la frecuencia depende linealmente del valor del número de Reynolds. Es decir, la frecuencia se puede controlar aumentando o disminuyendo el flujo másico.

E introduciendo los datos experimentales del estudio, en los que la frecuencia es siempre un poco menor, se comprueba que son, efectivamente muy similares.

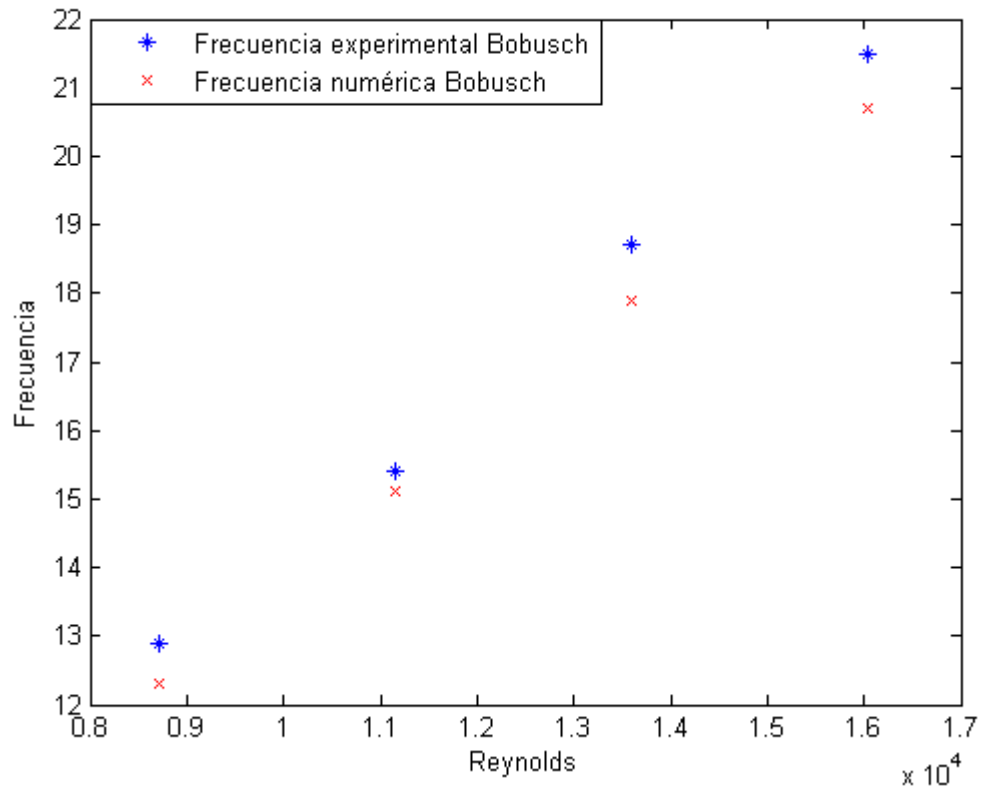


Figura 4.2: Valores del Reynolds frente a las frecuencias experimental y numérica de Bobusch

Una vez hecha esta constatación de que el Reynolds y frecuencia son directamente proporcionales, el estudio centra el resto de resultados tan solo en el caso de Reynolds = 16034, ya que el resto son análogos.

Mikel Ruiz Arozarena en su proyecto final de carrera, que está basado en los estudios anteriormente citados, quiso rehacer la simulación con este número de Reynolds, 16034, y para ello él creó la geometría de la pieza usando el programa SolidWorks, la importó a ANSYS Icem, elaboró varias mallas, y realizando un estudio de la independencia de la malla obtuvo con una malla óptima, que es

la que se utiliza en el presente estudio. Esta malla cuenta con 121551 nodos distribuidos a lo largo de la pieza de la manera que él consideró más oportuna, como se puede ver en la figura 4.3.

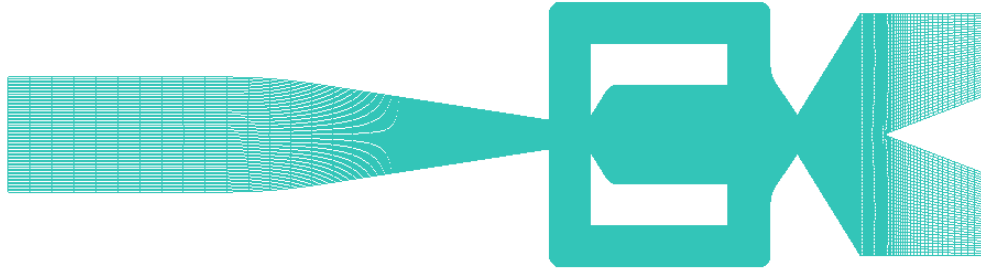


Figura 4.3: Mallado creado por Arozarena

Los detalles del mallado de la zona que cuenta con más nodos se muestran en la figura 4.4. Como se puede comprobar, la distribución no es homogénea, sino que las zonas que Arozarena consideró mas relevantes cuentan con más nodos.

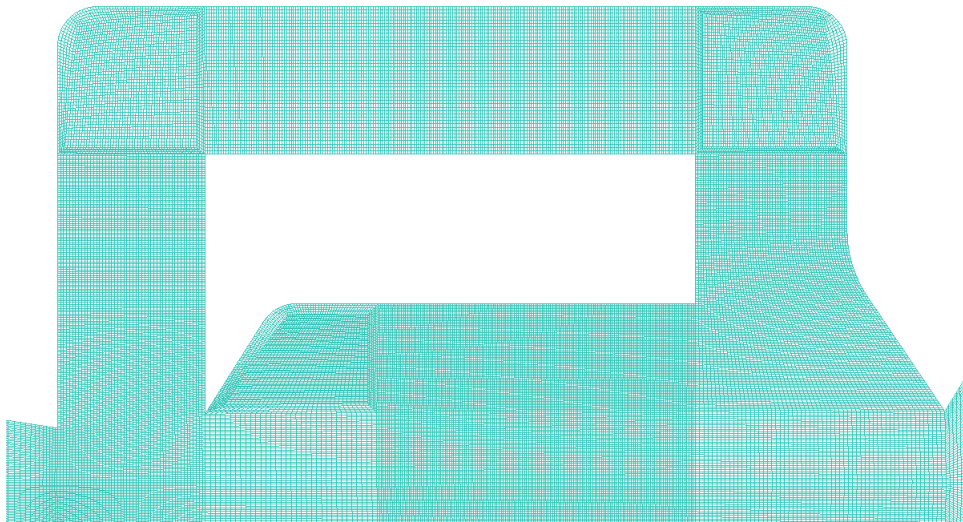


Figura 4.4: Detalle del mallado creado por Arozarena

En el estudio numérico realizado en Berlín, utilizan una malla más fina, que tiene 166782 nodos, pero como se verá más adelante, los resultados obtenidos en la universidad de Berlín se corresponden bastante con los resultados del proyecto final de carrera.

A la hora de simular usando ANSYS Fluent, Arozarena, no tenía manera de establecer que el Reynolds fuera de 16034, salvo probar diferentes velocidades

de entrada. Como la velocidad en la garganta, para este número de Reynolds es de $6,28 \text{ ms}^{-1}$, inicialmente uso una aproximación de 5 ms^{-1} . Este valor, dio lugar a un número de Reynolds bastante más grande, 51408, siendo el valor de la velocidad al final del conducto de entrada de 20.16 ms^{-1} , y es en este momento de la cronología de estos estudios cuando comienza este trabajo final de grado, de manera que sin conocer el valor de la velocidad de entrada que aproxima el Reynolds de los estudios de Berlín, se decide utilizar este valor de 5 ms^{-1} , dado que como se ha explicado antes, la discrepancia en el número de Reynolds dará lugar tan sólo a frecuencias más altas, pero que fácilmente se podrá verificar si los resultados de los estudios de Berlín coinciden con bastante exactitud con los que aquí se van a realizar.

En el caso de la simulación del oscilador original, realizada por Arozarena, y por mí mismo, la frecuencia obtenida es 46.8428 Hz. La duración de la simulación es aproximadamente de 1 día y 10 horas, tiempo muy similar al que emplean las simulaciones de Bobusch [15]. Si introducimos el dato de la frecuencia, con el Reynolds de 51408 en la gráfica anterior, obtenemos:

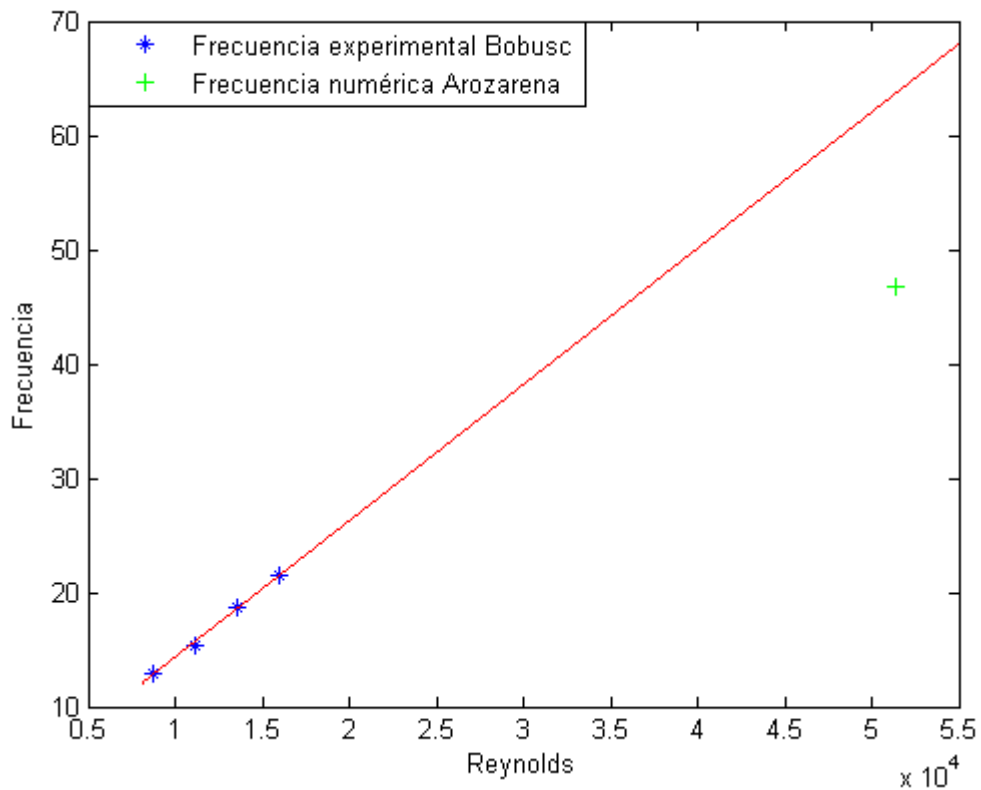


Figura 4.5: Valores del Reynolds frente a la frecuencia de Arozarena

Es cierto que se desvía bastante de la regresión de los datos experimentales, por eso, posteriormente Arozarena realizó varias simulaciones, para números de Reynolds menores, para ver si los valores que el obtenía coincidían con los de los estudios experimentales y numéricos. Obteniendo las frecuencias de la tabla 4.2.

Reynolds	Frecuencia numérica [Hz]
8509.1	10.2
14181.8	16.7
34036.3	33

Tabla 4.2: Relaciones de Reynodls y frecuencias. Arozarena [5]

Y si juntamos todos los datos que tenemos, obtenemos la gráfica 4.6.

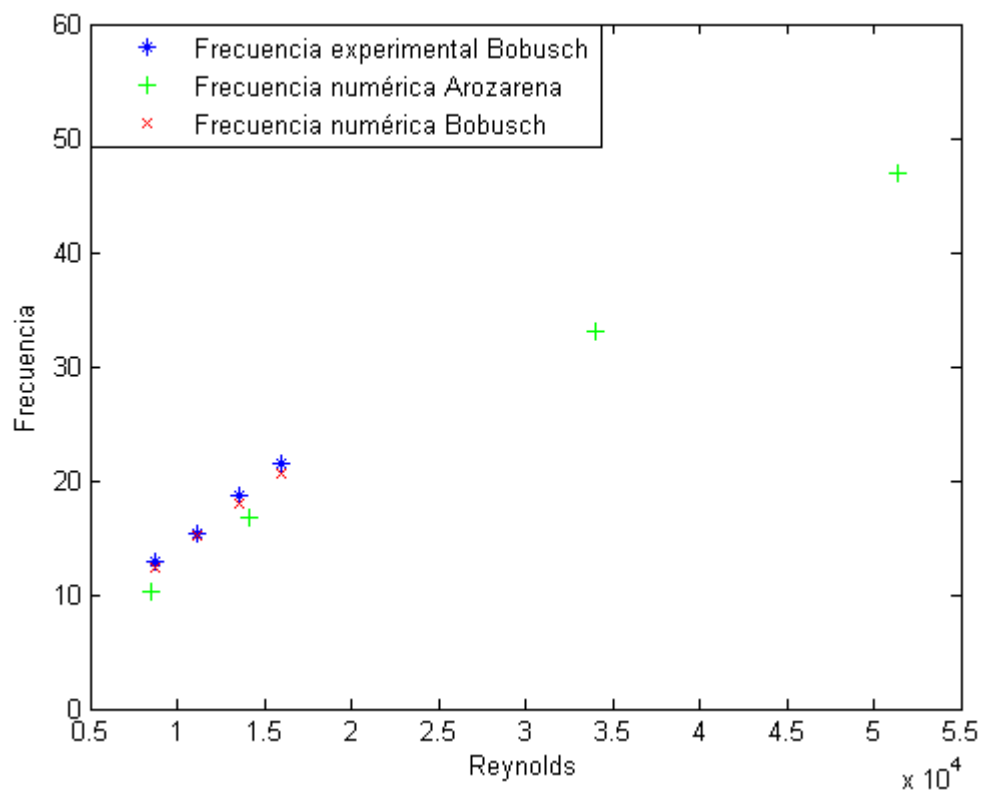


Figura 4.6: Valores del Reynolds frente a las frecuencias de Bobusch y Arozarena

Como se puede apreciar, los datos del proyecto final de carrera de Arozarena

no se desvían significativamente de los valores de los estudios de Bobusch. Una de las posibles causas de la discrepancia entre la recta de regresión y la simulación con Reynolds 51408 podría ser que efectivamente para valores de Reynolds más altos que los estudiados por Bobusch no exista una relación tan directa entre Reynolds y frecuencia, debido a algún fenómeno que tenga lugar en el interior del oscilador, y que por tanto la pendiente de la recta cambie. Por otro lado, también es posible que la malla usado no sea del todo precisa, y que eso derive en estas discrepancias entre los resultados aquí obtenidos y los resultados calculados en Berlín. Sea cual sea la causa, el objetivo de este trabajo consiste en estudiar el comportamiento cualitativo del oscilador frente a cambios de geometría, es decir, si la frecuencia crece o decrece, y parece una malla suficientemente fiable para obtener resultados correctos. Aún así sería interesante realizar más simulaciones, obteniendo un mayor número de valores en esta recta, y refinar más la malla para ver si efectivamente es un problema del mallado.

Una vez visto que los resultados de los estudios numéricos de la Technische Universität Berlin coinciden con los resultados del estudio experimental realizado en la misma universidad y que estos a su vez concuerdan con los realizados por Arozarena en su proyecto final de carrera, podemos extraer que los datos que se obtengan en este trabajo final de grado serán significativos. En todo caso, siempre que se disponga de los recursos, se puede realizar un estudio experimental para corroborarlo.

Capítulo 5

Cambios de geometría

De los diversos estudios realizados con anterioridad, se extrae que la frecuencia de un oscilador depende linealmente del Reynolds del flujo de entrada, cuanto mayor sea el Reynolds, mayor es la frecuencia, entonces, ¿por qué modificar la geometría para variar la frecuencia si podemos obtener diversas frecuencias modificando las condiciones de entrada? Pues bien, en algunas aplicaciones modificar las condiciones de entrada puede ser muy costoso, o muy difícil, como es el caso de su uso en las alas de los aviones. En este caso, disponer del oscilador con la frecuencia adecuada para el régimen de vuelo en que se vaya a utilizar, como puede ser aterrizaje y despegue, o incluso en condiciones de crucero, nos ahorraría tener que adaptar las condiciones de entrada con dispositivos piezoeléctricos.

Para estudiar el comportamiento de la frecuencia del oscilador a cambios de geometría se escogieron cuatro parámetros, que fueron considerados como los más relevantes.

Los cambios geométricos realizados pueden observarse en la figura 5.1. Se trata de 4 cambios, dos de longitud, y dos de ángulo. El primero es la amplitud de la garganta de entrada a la cámara de mezclado (1), posteriormente se realizó la modificación del ángulo de la cuña de la garganta de la cámara (2), en tercer lugar se varió la amplitud de la otra garganta (3), la de salida de la cámara y por último se cambió el ángulo de la cuña de salida de la cámara (4).

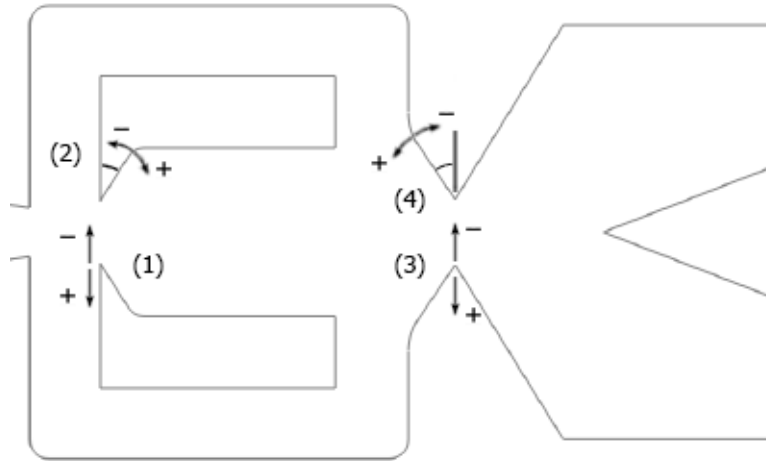


Figura 5.1: Cambios geométricos realizados

La imagen 5.2 del oscilador proviene del programa usado para realizar el mallado, y se usará para explicar los cambios de geometría realizados.

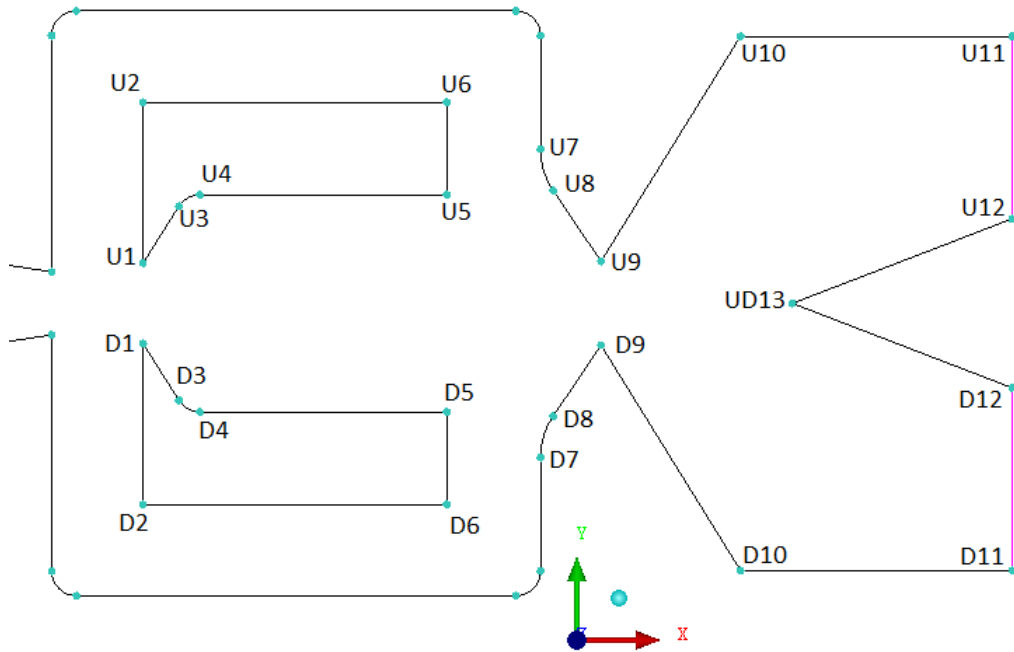


Figura 5.2: Puntos relevantes del oscilador fluido

La modificación de la amplitud de la garganta de entrada se lleva a cabo teniendo las siguientes consideraciones:

- Estrechar la garganta puede resultar en un aumento de la frecuencia, ya que facilitará que el flujo se adhiera a la pared de la cámara.
- Por el contrario, aumentar la amplitud puede dificultar esta adherencia.
- Una estrechez excesiva derivará seguramente en un fallo del dispositivo, es decir, no oscilará, porque el flujo no podrá pasar por la garganta, y se verá obligado a ir a través de los conductos de realimentación, imposibilitando que estos cumplan el importante papel que tienen en las oscilaciones. Por tanto, existirá un valor crítico de la amplitud de la garganta a partir del cual deja de oscilar.
- De la misma forma, ampliar mucho la dimensión de la garganta resultará en ausencia de oscilaciones, ya que el flujo no llegará a adherirse a ninguna de las paredes.

Este es el comportamiento esperado que se prevé, y por el cual se considera interesante realizarlo para obtener un mayor conocimiento de este oscilador.

La amplitud original de la garganta es de 3.25 mm (y la del final del inlet de 2.55 mm). Todos los cambios realizados son simétricos, ya que modificar la simetría de la pieza significaría, seguramente, hacer desaparecer una de las dos configuraciones estables. El cambio geométrico que se hizo consiste en mover los puntos U1-U6 y D1-D6, figura 5.2, una distancia determinada (ambos en la misma medida) en la dirección del eje y. No se movieron simplemente los puntos U1 y D1 para evitar cambiar el ángulo que se estudiará en la segunda modificación.

En la figura 5.3 es posible observar los puntos que han sido desplazados en la dirección del eje y en este cambio de la amplitud de la garganta de entrada a la cámara de mezclado.

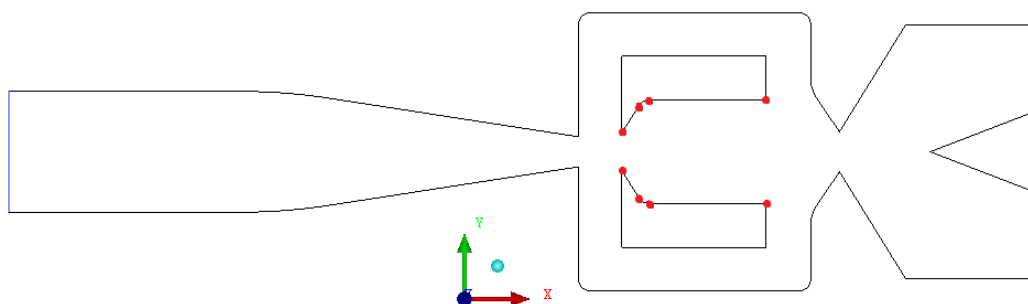


Figura 5.3: Puntos desplazados en la modificación de la amplitud de la garganta de entrada a la cámara

En la tabla 5.1 se detallan los cambios realizados, donde el valor de la primera columna coincide con la distancia que los puntos han sido desplazados.

Modificación de la amplitud [mm] (respecto a la línea de simetría)	Amplitud total [mm]
+1.00	5.25
+0.75	4.75
+0.625	4.50
+0.50	4.25
+0.375	4.00
+0.25	3.75
+0.125	3.50
-0.125	3.00
-0.25	2.75
-0.375	2.50
-0.50	2.25
-0.75	1.75
-1.00	1.25

Tabla 5.1: Modificaciones de la garganta de entrada a la cámara

Inicialmente no se realizaron tantos cambios, pero a la luz de los resultados preliminares obtenidos se decidió hacer todos estos.

La modificación del ángulo de entrada a la cámara es un cambio un tanto más polémico.

- Aumentar el ángulo facilitará la adherencia del flujo a la pared de la cámara, pero también puede hacer que la burbuja de recirculación, fenómeno muy importante para que se produzca la oscilación, no aparezca. Se desconoce cómo puede llegar a comportarse, pero se espera, igual que en la modificación anterior, la aparición de un valor crítico del ángulo.
- Disminuirlo resultará en un retraso del tiempo que tarda el flujo en adherirse a la pared y por tanto la frecuencia de oscilación disminuirá.

Una vez más, esto es tan sólo una hipótesis de lo que puede llegar a pasar, pero es por esta peculiaridad de la modificación por la que se quiere llevar a cabo esta y no otra.

El ángulo inicial es 3.26° , este cambio consistió en desplazar los puntos U3, U4, D3 y D4, figura 5.2, en la dirección del eje x, la distancia necesaria hasta conseguir el ángulo deseado.

Este cambio se ha realizado desplazando los puntos marcados en la figura 5.4, en la dirección del eje x.

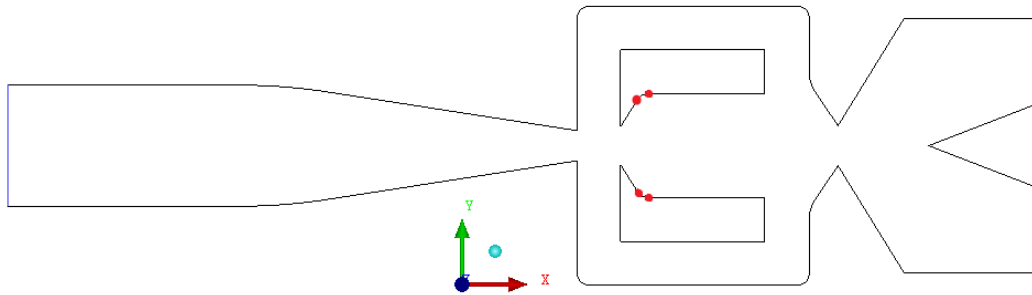
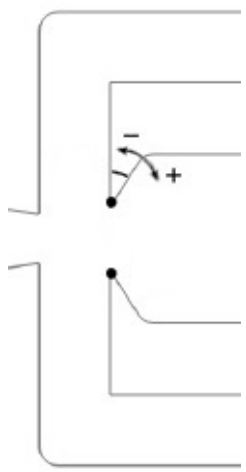


Figura 5.4: Puntos desplazados en la modificación del ángulo de entrada a la cámara

En la tabla 5.2 se detallan igual que antes los cambios. De la misma forma que en el cambio anterior, inicialmente se hicieron menos modificaciones, pero se acabaron por realizar más.



Modificación del ángulo [°]	Ángulo total [°]
+15	47.26
+10	42.26
+7.5	39.76
+5	37.26
+2.5	34.76
-2.5	29.76
-5	27.26
-7.5	24.76
-10	22.26
-15	17.26

Tabla 5.2: Modificaciones del ángulo de entrada a la cámara

La modificación de la amplitud de la salida de la cámara es también un parámetro cuyo comportamiento tras una modificación es difícil de estimar.

- Por un lado, estrecharlo puede que parezca que favorece que el flujo se adhiera a la pared exterior del outlet, una vez ha sobrepasado la garganta, haciendo más difícil la transición del flujo hacia el otro outlet, aunque parece poco probable.
- Al mismo tiempo, disminuir el ángulo, favorecerá que el flujo al chocar con la cuña de entrada a la garganta sea redirigido hacia los conductos de realimentación, aumentando la frecuencia de las oscilaciones.
- Lo único seguro sobre estrechar la amplitud de la garganta, es que a partir de un cierto valor, las oscilaciones cambiaran su comportamiento, dado que estrecharlo mucho producirá un aumento de la velocidad aguas abajo.
- Ampliarlo en cambio parece tener un comportamiento más sencillo, al flujo le resultará fácil dirigirse hacia los outlets, y el flujo másico a través de los conductos de realimentación se reducirá, reduciendo la frecuencia de las oscilaciones.

En el siguiente capítulo se comprobará si estas predicciones se cumplen o no.

La amplitud original de la garganta es de 3.40 mm. Igual que en la primera modificación, los cambios se hacen respetando la simetría del dispositivo. Se movieron los puntos U7-U9 y D7-D9, figura 5.2, en la dirección del eje y. Este cambio se hizo así para evita tocar el ángulo que se modificará posteriormente en el siguiente cambio.

Los puntos listados en el párrafo anterior son los que aparecen en la figura 5.5. Se movieron en la dirección del eje y.

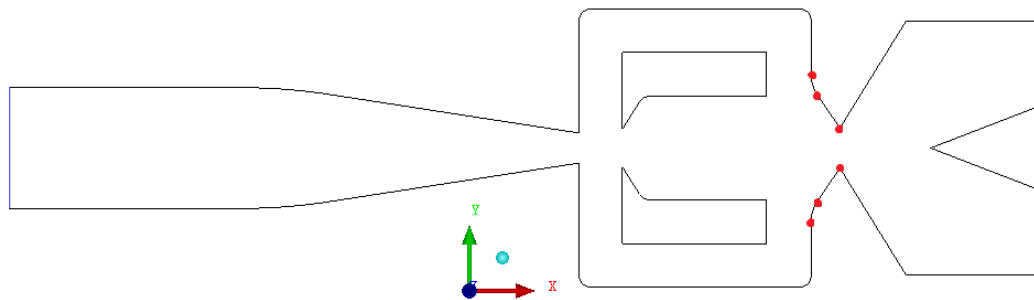



Figura 5.5: Puntos desplazados en la modificación de la garganta de salida de la cámara

Una vez más la tabla 5.3 muestra los cambios realizados finalmente, ya que en un primer momento no se realizaron tantos. La primera columna coincide con la distancia que los puntos han sido desplazados.



Modificación de la amplitud [mm] (respecto a la línea de simetría)	Amplitud total [mm]
+1.00	5.40
+0.875	5.15
+0.75	4.90
+0.625	4.65
+0.50	4.40
+0.375	4.15
+0.25	3.90
-0.25	2.90
-0.50	2.40
-0.75	1.90
-1.00	1.40

Tabla 5.3: Modificaciones de la garganta de salida de la cámara

El cuarto y último cambio, el del ángulo de la cuña de la garganta de salida, parece el cambio con el comportamiento más predecible.

- Aumentar el ángulo reducirá la frecuencia, porque el flujo que impacta sobre la cuña se verá redirigido hacia el outlet y no hacia el conducto de realimentación.
- De manera contraria, reducirlo provocará mayor flujo aguas arriba en dichos conductos, que se traducirá en un aumento de la frecuencia.

El ángulo original es 34.00° . Se movieron los puntos U9-U12, D9-D12 y UD13, figura 5.2, en la dirección del eje x, para conseguir el cambio deseado. Estos puntos son los destacados en la figura 5.6.

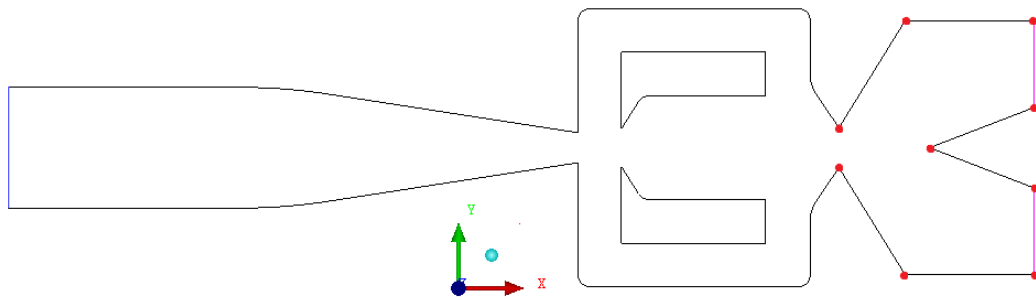
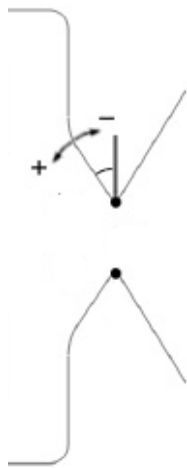


Figura 5.6: Puntos desplazados en la modificación del ángulo de salida de la cámara

En la tabla 5.4 están todos los ángulos para los que se ha estudiado la frecuencia del oscilador.



Modificación del ángulo [°]	Ángulo total [°]
+20	54.00
+15	49.00
+10	44.00
+5	39.00
-5	29.00
-10	24.00
-15	19.00
-20	14.00

Tabla 5.4: Modificaciones del ángulo de salida de la cámara

A la luz de los resultados estos datos se consideraron más que suficientes para deducir el comportamiento del oscilador.

Como se ha podido observar, prácticamente todos los cambios realizados de los diferentes parámetros de estudio son muy pequeños. Esto se debe a que no se pretende modificar en exceso el comportamiento del oscilador.

Una vez decididos y estudiados los cambios a realizar, se puede empezar con los correspondientes estudios numéricos.

Capítulo 6

Estudio computacional

Explicado ya el contexto del trabajo y los cambios geométricos que se han realizado, es posible empezar a explicar cómo se ha llevado a cabo el estudio y los resultados y conclusiones que de él se extraen.

El objetivo de este estudio consiste en, primero, estudiar el oscilador fluídico en unas condiciones lo más parecidas a las del estudio experimental realizado en Berlín, para poder corroborar que estos resultados son correctos. Y en segundo lugar, en estudiar el comportamiento del oscilador frente a pequeñas variaciones de la geometría.

Al igual que en el caso del estudio de Arozarena, se trata de un estudio en dos dimensiones del oscilador fluídico. El hecho de que no se haga en 3D es debido a que se ha querido simplificar los cálculos, ya que realizar el modelado 3D es mucho más costoso, igual que el coste computacional, aunque bien es cierto que el resultado final podría diferir del estudio 2D, ya el grosor de la pieza es de un orden de magnitud inferior al del resto de dimensiones y la capa límite podría jugar un papel muy importante. Como lo que se busca es conocer el comportamiento cualitativo del oscilador, se ha despreciado este efecto.

El estudio computacional se llevó a cabo con las herramientas de ANSYS Icem y ANSYS Fluent, dos programas cuyo uso en el sector de la mecánica de fluidos está ampliamente extendido.

6.1. Diseño de la geometría y mallado

El diseño de la pieza original ya fue realizado por Arozarena, por lo que ya se disponía del modelo original, y no sería necesario crearlo de nuevo.

Para modificar la geometría, en vez de modificar el modelo de SolidWorks que hizo Arozarena, se quiso aprovechar al máximo el hecho de que ya se tenía el modelo original, y mediante un editor de textos, se pudo modificar las coordenadas de los puntos que se pretendía mover, así como de las curvas que los unían. De esta forma se crearon los 42 modelos, de los cuatro cambios geométricos realizados, que luego serían simulados.

Una vez se dispone de la geometría el siguiente paso es crear el mallado. Una malla no es más que una discretización del dominio de trabajo en celdas, muy pequeñas, donde se resolverán las ecuaciones que rigen el problema físico. La malla creada por Arozarena usando el programa ANSYS Icem, un programa para generar mallados de geometrías, tiene 121551 nodos. Arozarena intentaba que no hubiera cambios de área grandes entre celdas contiguas, y que las celdas conservaran su forma (distorsionándola cuando fuera necesario), dos aspectos fundamentales a la hora de crear una buena malla.

Además como el oscilador es una geometría no demasiado compleja, usó un desarrollo en bloques estructurados, es decir, todos con el mismo número de lados, y cada vértice conecta el mismo número de bloques. Los bloques estructurados se distribuyen a lo largo de toda la geometría, llenándola, como se puede ver en la figura 6.1. A su vez dentro de cada bloque, hay mallas estructuradas, lo que permite hacer un mallado muy complejo y completo, ya que los bloques permiten realizar una primera división de la geometría.

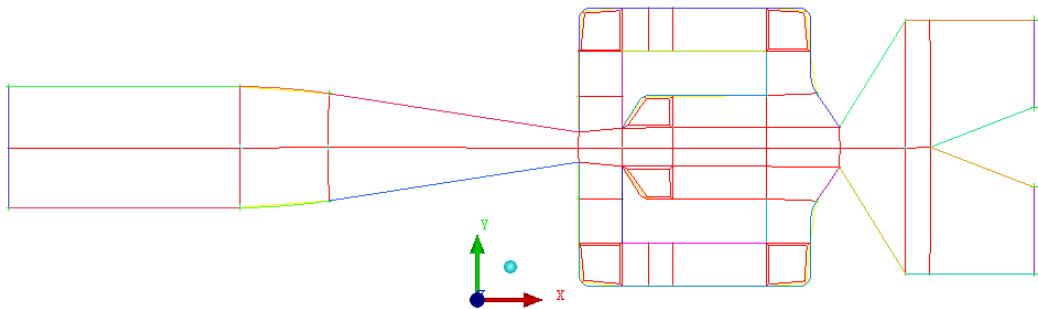


Figura 6.1: Desarrollo en bloques de Arozarena [5]

Ante la complejidad de este mallado, crearlo de nuevo para las 42 nuevas geometrías habría supuesto una enorme inversión de tiempo, así que, aprovechando la similitud entre la pieza original y las nuevas geometrías, se buscó adaptar el mallado original a los nuevos modelos. Para ello, mediante el progra-

ma ANSYS Ice, reasociando aristas y v rtices de la malla y de la geometría se consiguió que la malla original se adaptara a las otras geometrías, que como se ha explicado antes, diferían muy poco de la original.

6.2. Simulaciones

Teniendo las mallas creadas por ANSYS Ice, el siguiente paso consiste en emplear el programa ANSYS Fluent para modelar el flujo que atraviesa el oscilador.

ANSYS Fluent

Para poder entender la explicación de como se han hecho las simulaciones, primero es necesario comprender como funciona el programa utilizado, ANSYS Fluent.

Fluent utiliza el método de volúmenes finitos para resolver los problemas. Este método consiste en discretizar todo el dominio en una serie de puntos (nodos), de manera que en lugar de resolver las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del fluido en la geometría, las aproxima a ecuaciones algebraicas, que resolver  en cada nodo de la malla.

Este método resuelve las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía. En nuestro caso, se ha omitido la ecuación de la energía por el corto periodo de tiempo que transcurre durante las oscilaciones. Así, las ecuaciones a resolver son expresión 6.1 y 6.2. Esta última corresponde únicamente a la componente x, también hay que considerar la componente y.

$$\nabla(\rho\vec{v}) + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}u) \quad (6.2)$$

Dado que se trabaja con un líquido a velocidades suficientemente bajas para ser considerado flujo incompresible para resolver el problema se utiliza un método de corrección de presiones denominado SIMPLE. SIMPLE simplifica las ecuaciones 6.1 y 6.2 imponiendo densidad constante. De manera que las ecuaciones de conservación de masa, si aplicamos una aproximación hacia ade-

lante en la derivada temporal y una aproximación centrada en las derivadas espaciales queda de la forma:

$$(\rho v)_{i+1/2,j}^{n+1} = (\rho v)_{i+1/2,j}^n + A\Delta - \frac{\Delta t}{\Delta x}(p_{i+1,j}^n - p_{i,j}^n) \quad (6.3)$$

Donde A es una expresión que depende de la velocidad en el instante n en las celdas adyacentes, la densidad, y los incrementos espaciales. Se realiza el mismo análisis para la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y se tiene en cuenta una corrección de presión de la forma: $p = p * + p'$; $u = u * + u'$; $v = v * + v'$, en la cual la variable * representa el campo anterior, y la variable ' simboliza su corrección.

Una vez realizados estos cálculos, se unen las dos ecuaciones para obtener la ecuación 6.4.

$$ap'_{i,j} + bp'_{i+1,j} + cp'_{i,j+1} + cp'_{i,j-1} - d = 0 \quad (6.4)$$

Donde a, b y c son expresiones que dependen de los incrementos temporales y espaciales, pero que carecen de importancia para este trabajo y

$$d = \frac{1}{2} \left(\frac{(pu)_{i+1/2,j} - (pu)_{i-1/2,j}}{\Delta x} + \frac{(pu)_{i,j+1/2} - (pu)_{i,j-1/2}}{\Delta y} \right)$$

Con esta ecuación podemos obtener la corrección de las variables y para cada paso de tiempo se han realizado iteraciones hasta que el valor de 'd' sea menor que 10^{-5} , valor a partir del cual se considera que la solución ha convergido.

Características de las simulaciones

Antes de ejecutar ANSYS Fluent para un fluido no estacionario, dado que las simulaciones pueden llegar a tardar varios días, primero se hace una aproximación de la solución, para un flujo estacionario, siguiendo un modelo de flujo laminar y posteriormente turbulento, todo con el objetivo de reducir al mínimo el tiempo de cálculo de cada simulación.

Con el fin de que las simulaciones se asemejen lo máximo posible al estudio experimental de la Technische Universitat Berlin, se ha intentado que todas las condiciones de frontera y los parámetros de la simulación sean los mismos que en esos experimentos.

Primero, se establece agua como fluido de trabajo (igual que en los estudios anteriores). Y para un flujo estacionario laminar, se establece una velocidad de entrada 5 ms^{-1} y una presión en ambas salidas de 979 Pa superior a la presión atmosférica, que equivale a la presión que produce la columna de agua a la profundidad a la que se realizó el experimento en la Technische Universitat Berlin. Después se inicializa la solución y se ejecuta durante 100 iteraciones, obteniendo una primera aproximación de la solución.

Para aproximar aún más la solución que se obtendrá al realizar la simulación del flujo no estacionario, se ejecutan también algunas iteraciones para un flujo turbulento.

Para ello, es necesario establecer el modelo de turbulencia más adecuado, así como condiciones de entrada y salida complementarias, como son intermitencia, la intensidad de turbulencia y el diámetro hidráulico.

La turbulencia introduce un comportamiento caótico y difícil de modelizar con gran exactitud. Existen diferentes modelos que tratan de predecir dicho comportamiento caótico. Estos se conocen como modelos de turbulencia.

Para modelizar la turbulencia se utilizan las ecuaciones Reynolds averaged Navier Stokes (RANS), que dividen cada magnitud en una componente media más una componente de fluctuación.

Para resolver el problema usando las ecuaciones RANS, aparte de la ecuación de Navier Stokes, es necesario añadir otras ecuaciones. En estas ecuaciones aparece el coeficiente de viscosidad dinámica, y dependiendo del método que se use para el cálculo de dicho parámetro se distinguen los diferentes modelos de turbulencia.

El modelo de turbulencia escogido es el transición SST [16] (Shear Stress Transport). Este modelo se basa en el modelo $k - \varepsilon$, que mediante dos ecuaciones en derivadas parciales, relaciona la velocidad de disipación ε con la energía cinética k . El modelo SST además trata las paredes como superficies rugosas, para predecir con mayor exactitud la zona de separación del flujo. Es el mismo modelo que se usa en los estudios de la Technische Universitat Berlin y el que usa Arozarena, haciendo primero un estudio de los diferentes modelos que ofrece ANSYS Fluent, y viendo cual se aproxima más a la solución experimental. Cabe mencionar también que en las simulaciones que se han realizado, no se ha introducido la ecuación del calor, debido al corto periodo de tiempo durante el cual se ejecuta, sólo 0,07 segundos, (oscilaciones muy rápidas) y a que en este

proceso apenas tiene relevancia.

En cuanto a las condiciones de contorno, ANSYS Fluent permite elegir entre diferentes ternas de parámetros. En este caso se eligió la intermitencia, la intensidad de turbulencia y el diámetro hidráulico. El diámetro hidráulico (D_h) sirve para estudiar el comportamiento del flujo de un canal no circular como si fuera circular y se calcula como $D_h = \frac{4A}{P}$ donde A es el área del conducto y P el perímetro. En el caso del inlet es 2,85 mm y en el de los outlets es 4,51 mm. La intensidad de turbulencia es un parámetro que sirve para cuantificar la perturbación que sufre el fluido, y se define como la raíz cuadrada de las fluctuaciones de la velocidad dividida por la velocidad media del fluido. En este caso se estableció en un 10 %, un valor alto. La intermitencia por su parte, representa la fracción de tiempo entre flujo turbulento y flujo laminar. En las simulaciones se mantiene constante, y con un valor de una unidad. Los valores de estos parámetros vienen definidos por el proyecto final de carrera de Arozarena, y no se discutirán en este trabajo.

Este modelo se ejecutó durante 200 iteraciones, llegando a una solución que se usará como solución inicial para resolver el modelo no estacionario del oscilador fluídico.

Para resolver, finalmente, el modelo no estacionario, además de todas las condiciones de contorno que se impusieron en el caso de flujo estacionario turbulento, también se estableció un paso de tiempo de 10^{-6} segundos, valor óptimo que halló y estableció para futuros trabajos Arozarena.

Para poder discernir si la solución ha convergido es necesario establecer unos criterios de convergencia. Primero, para cada paso de tiempo, se exige que el valor del residuo, como se ha explicado a principio de la sección, sea inferior a 10^{-5} y para establecer la convergencia temporal se usa un criterio gráfico, es decir, que a simple vista sea imposible apreciar ninguna diferencia entre un ciclo y el anterior.

Para poder obtener la frecuencia de las oscilaciones se pusieron dos monitores de flujo másico, uno en cada outlet, es decir, ANSYS Fluent guardaba en un archivo de texto de los valores del flujo másico que atravesaba cada outlet en cada paso de tiempo.

Para resumir este capítulo, en la tabla 6.1 se recogen todas las características de las simulaciones.

Modelos simulados	42
Densidad de malla	121551 nodos
Iteraciones flujo laminar	100
Iteraciones flujo turbulento	200
Paso de tiempo	10^{-6} segundos
Fluido de trabajo	agua
Velocidad de entrada	5 m/s
Presión relativa en las salidas	979 Pa
Modelo de turbulencia	SST
Diámetro hidráulico entrada	2,85 mm
Diámetro hidráulico salidas	4,51 mm
Intensidad de turbulencia	10 %
Intermitencia	1

Tabla 6.1: Características de las simulaciones

Debido a que cada simulación tardaba algo más de un día en terminar, se ha usado el Clúster de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial Y Aeronáutica de Terrassa para realizar las simulaciones, algunas de manera simultánea.

Una vez conocidas todas las características de las simulaciones que se van a realizar, es posible comprender los resultados que expuestos en el siguiente capítulo.

Capítulo 7

Resultados

En este capítulo se presentan todos los resultados obtenidos de las simulaciones. Por un lado se mostrará la frecuencia para cada variación de la geometría, así como la evolución del flujo másico que atraviesa los dos outlets. En los casos que se considere interesante, también aparecerá una imagen de la solución inicial con la que ha comenzado la simulación. Todos los resultados serán analizados, con el fin de sacar conclusiones sobre el comportamiento cualitativo del oscilador fluídico frente a cambios de geometría.

Oscilador original

El oscilador fluídico original, en el que se basa todo el estudio, como ya se ha dicho antes, para las condiciones en las que se ha simulado, tiene una frecuencia de 46.8428 Hz, para un Reynolds de 51408.

En la figura 7.1 se presenta la evolución temporal de la velocidad dentro del oscilador. Como se puede observar, las imágenes de la figura se corresponden con el funcionamiento explicado en el capítulo 3.

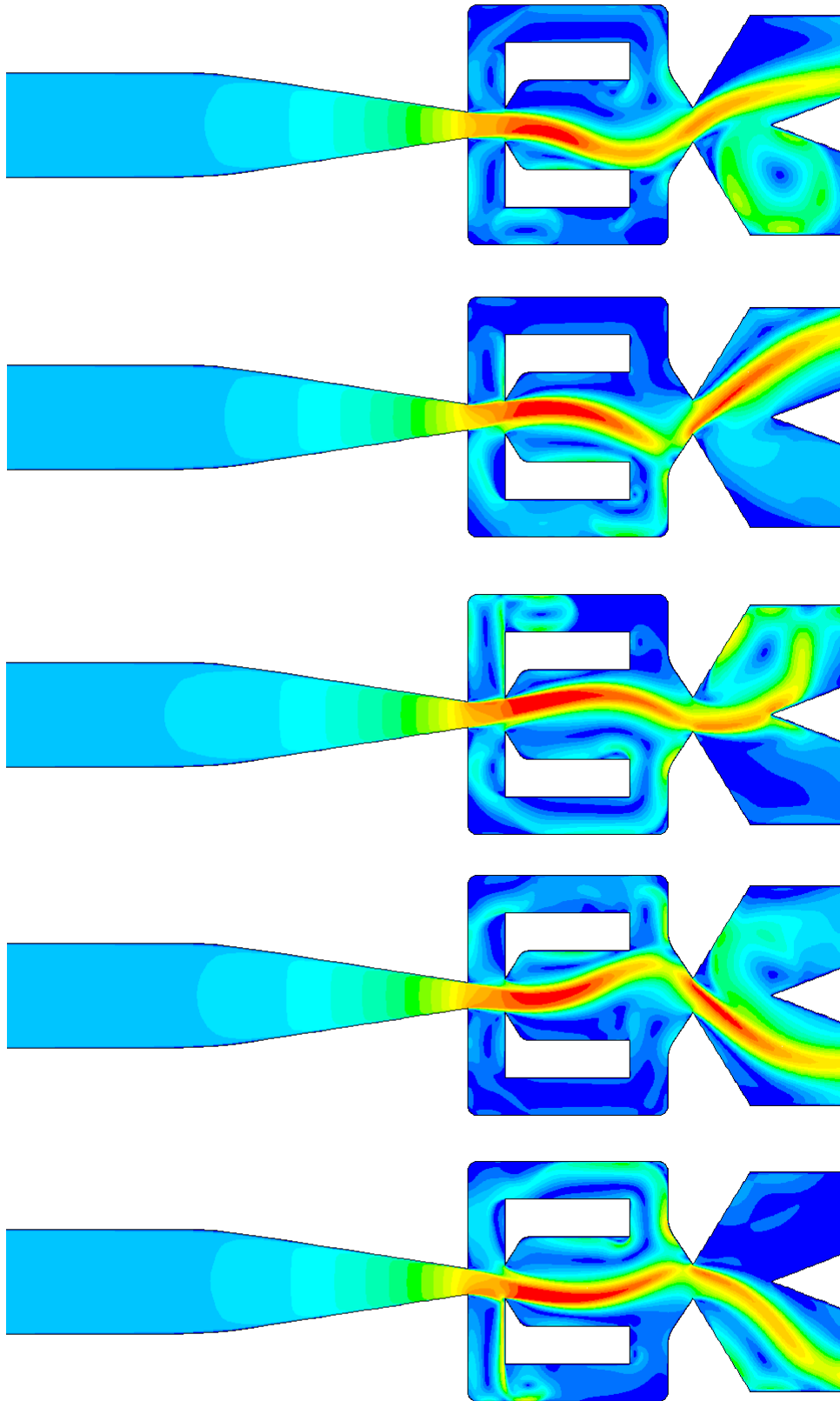


Figura 7.1: Evolución del perfil de velocidades del oscilador original

Una vez realizada la simulación, se obtuvo el flujo másico de ambos outlets, así como del inlet. El outlet 1 es el outlet superior, y el 2 el inferior. Para todas las simulaciones, dado que se ha comprobado la convergencia temporal, se presenta tan solo un ciclo del flujo másico. Para casi todas las simulaciones, con 100000 pasos de tiempo ha sido suficiente para poder establecer la convergencia, pero en algunas han sido necesarios más pasos de tiempo.

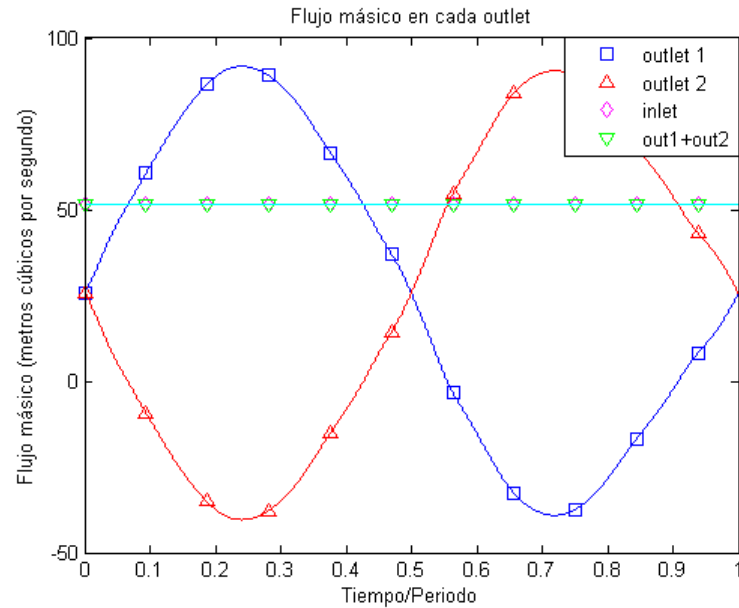


Figura 7.2: Flujo másico a través de cada apertura del oscilador original

El criterio de signos utilizado es el siguiente: positivo si sale a través de los outlets, negativo si entra, y todo lo contrario en el inlet.

Evidentemente, como cabía de esperar, el flujo a través del inlet es el mismo que la suma del flujo a través de los dos outlets.

La frecuencia se ha obtenido midiendo la distancia entre dos máximos para un mismo outlet.

En las siguientes secciones se presentan las gráficas de las simulaciones de las distintas modificaciones. En cada gráfica se puede ver en ciclo del flujo másico que atraviesa cada outlet. En el caso de que no se hayan producido oscilaciones, se presenta la evolución del flujo másico hasta que la solución ha convergido.

Modificación de la garganta de entrada a la cámara

Los diferentes valores de las amplitudes que se van a simular se encuentran en la tabla 7.1

Modificación de la amplitud [mm] (respecto a la línea de simetría)	Amplitud total [mm]
+1.00	5.25
+0.75	4.75
+0.625	4.50
+0.50	4.25
+0.375	4.00
+0.25	3.75
+0.125	3.50
-0.125	3.00
-0.25	2.75
-0.375	2.50
-0.50	2.25
-0.75	1.75
-1.00	1.25

Tabla 7.1: Modificaciones de la garganta de entrada a la cámara

Es necesario recordar que para esta modificación, la de la amplitud de la garganta de entrada a la cámara, se esperaba que estrechar la garganta aumentara la frecuencia de las oscilaciones, hasta un cierto punto en el que dejara de oscilar, y ampliar el diámetro de la garganta produjera una disminución de la frecuencia.

A continuación se encuentran todas las gráficas de flujo másico.

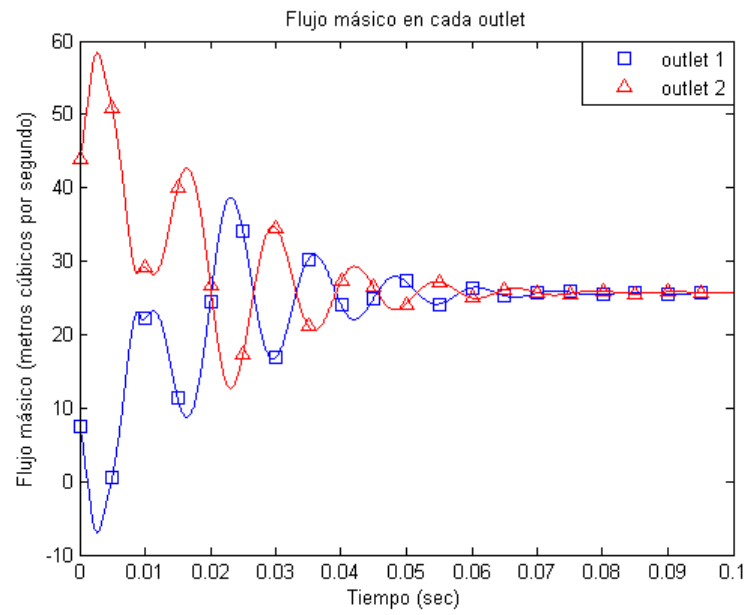


Figura 7.3: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 5.25 mm. No hay oscilaciones

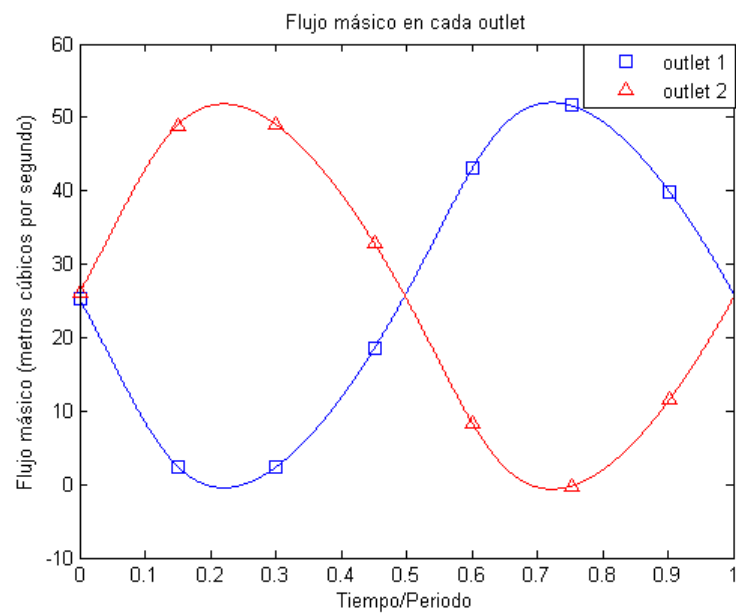


Figura 7.4: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.75 mm. La frecuencia es 74.77 Hz.

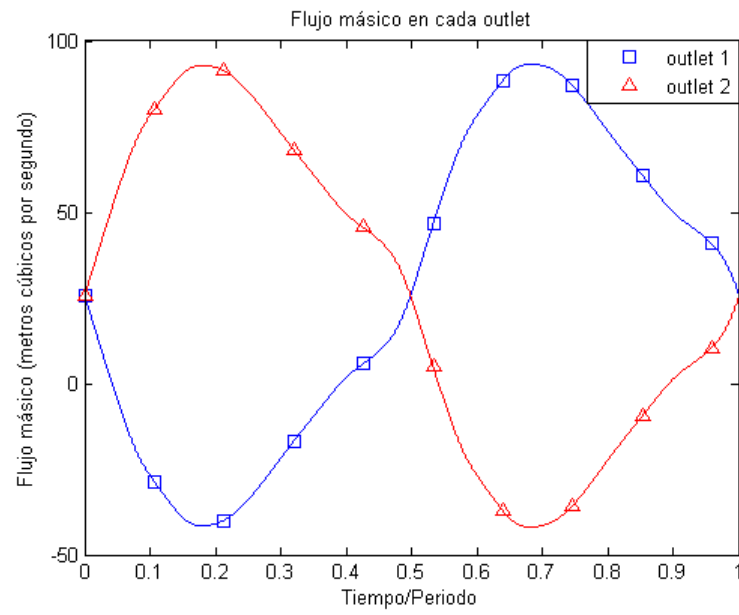


Figura 7.5: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.50 mm. La frecuencia es 52.98 Hz.

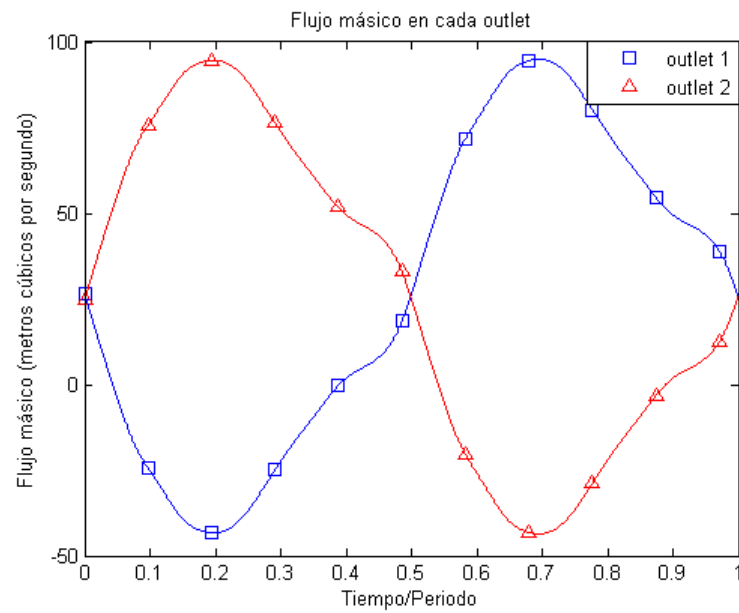


Figura 7.6: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.25 mm. La frecuencia es 48.83 Hz.

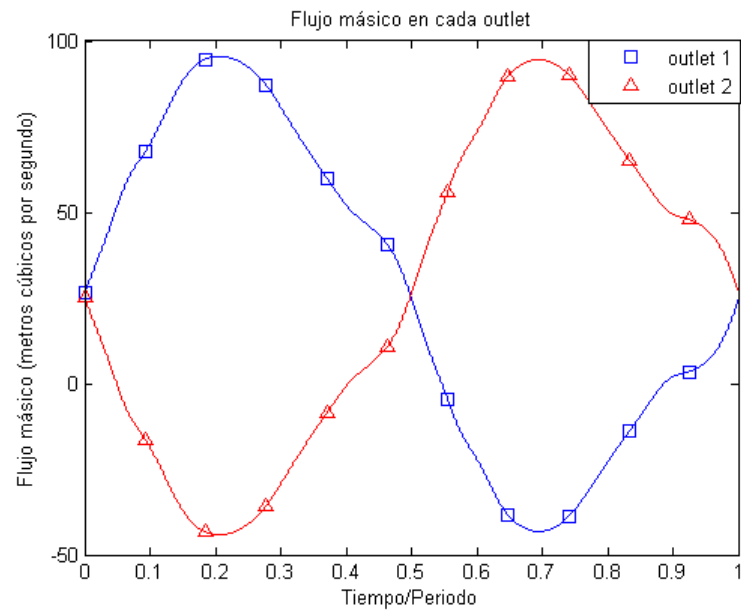


Figura 7.7: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.00 mm. La frecuencia es 46.24 Hz.

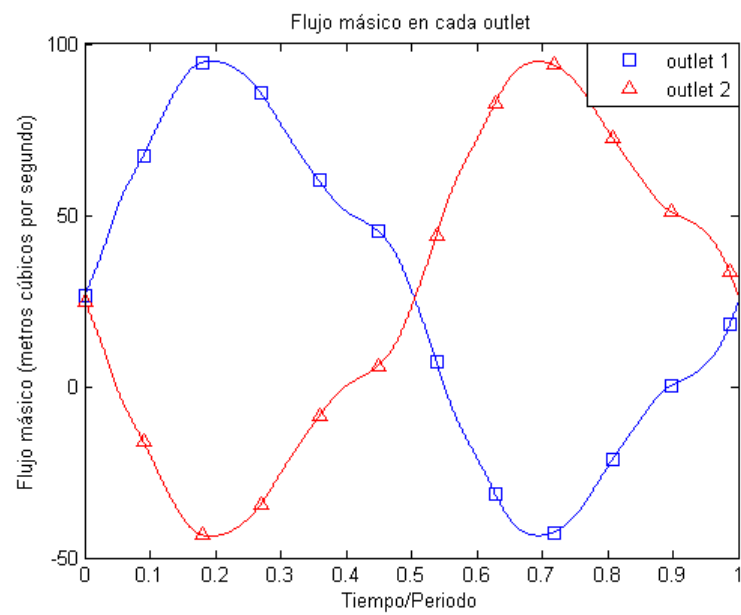


Figura 7.8: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 3.75 mm. La frecuencia es 44.45 Hz.

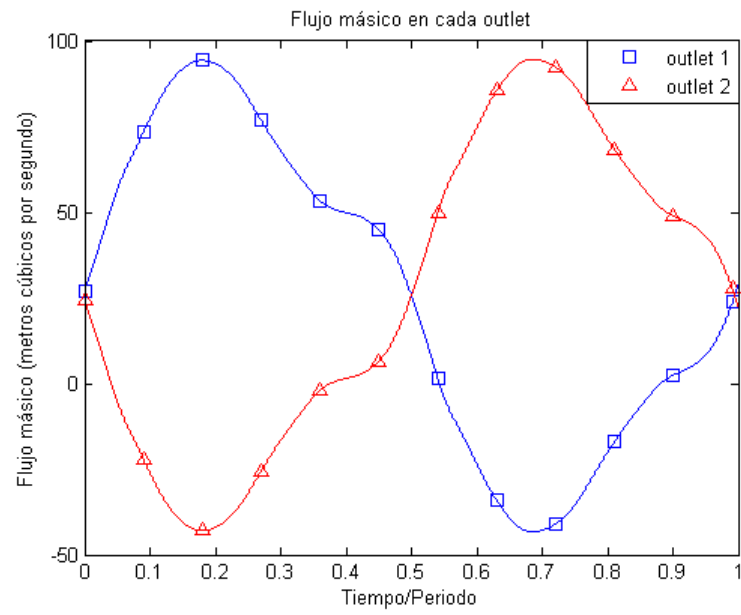


Figura 7.9: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 3.50 mm. La frecuencia es 45.57 Hz.

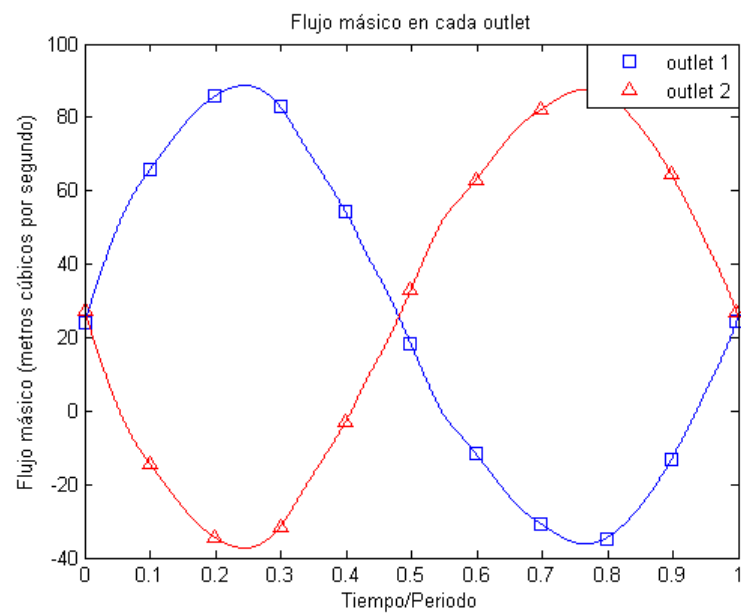


Figura 7.10: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 3.00 mm. La frecuencia es 50.01 Hz.

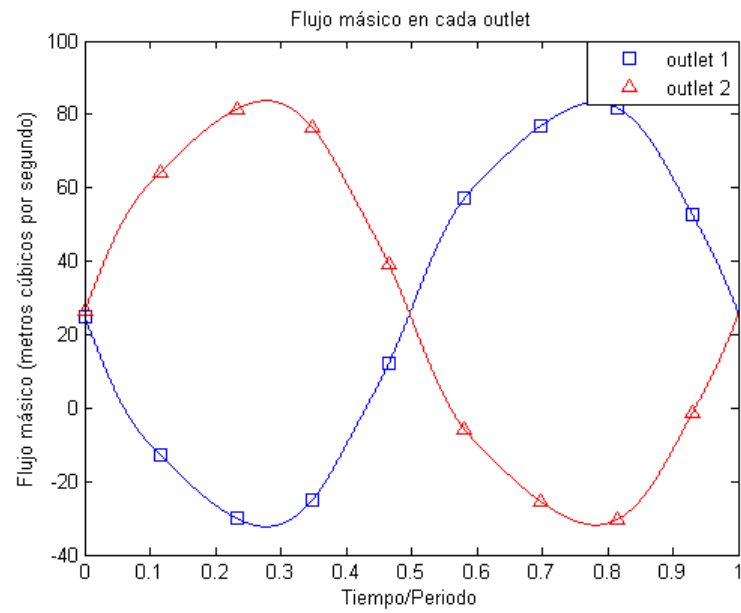


Figura 7.11: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 2.75 mm. La frecuencia es 58.41 Hz.

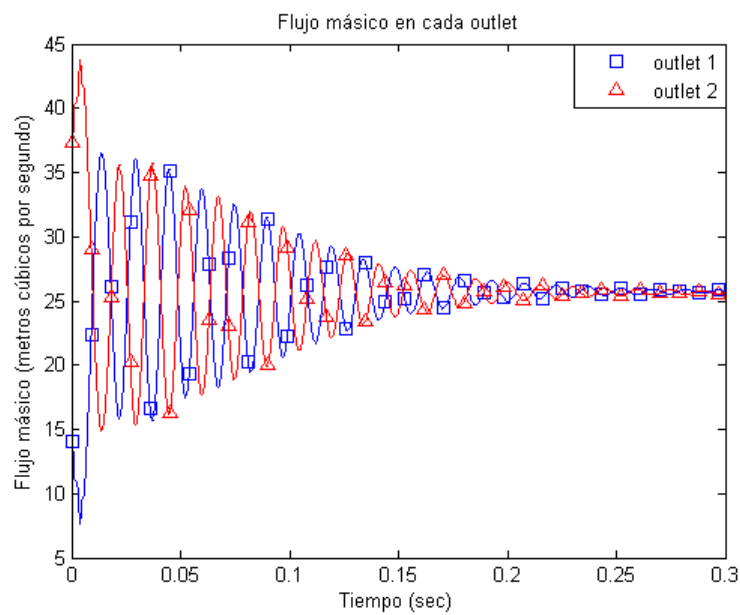


Figura 7.12: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 2.50 mm. No hay oscilaciones.

Para una amplitud de la garganta de 2,25 mm, al igual que en los casos que quedan, la solución inicial ya hacía prever que posiblemente no oscilaría.

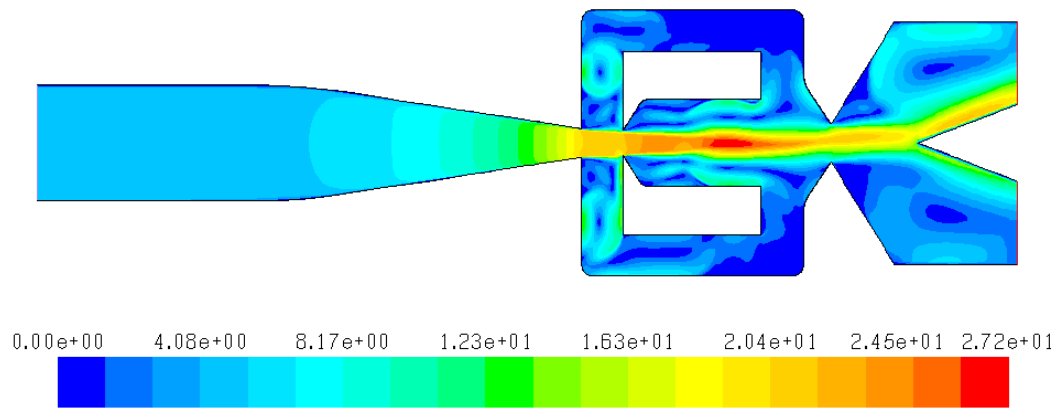


Figura 7.13: Perfil de velocidades inicial para una amplitud de la garganta de 2.25 mm

La diferencia de amplitudes entre el final del inlet y la garganta estudiada hace que parte del flujo no pueda entrar en la cámara y se desvíe hacia los conductos de realimentación, provocando que estos no puedan desempeñar su función. Como era de esperar, no hay oscilaciones.

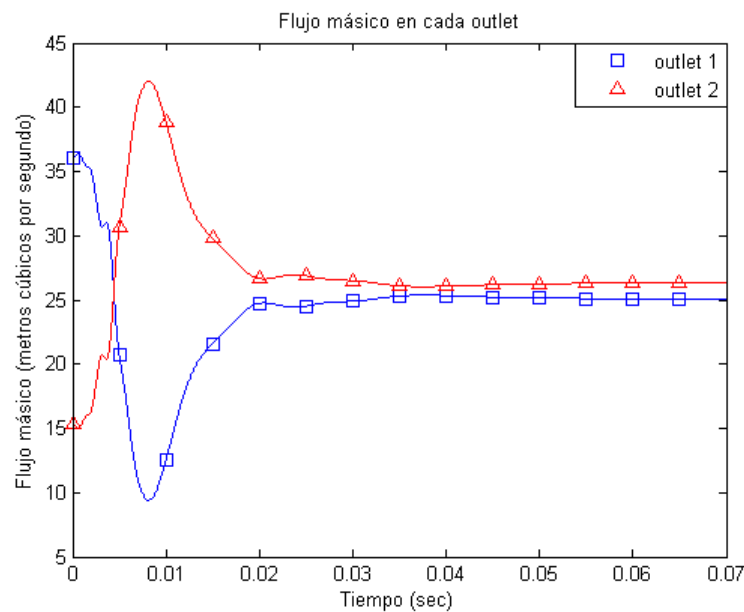


Figura 7.14: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 2.25 mm. No hay oscilaciones.

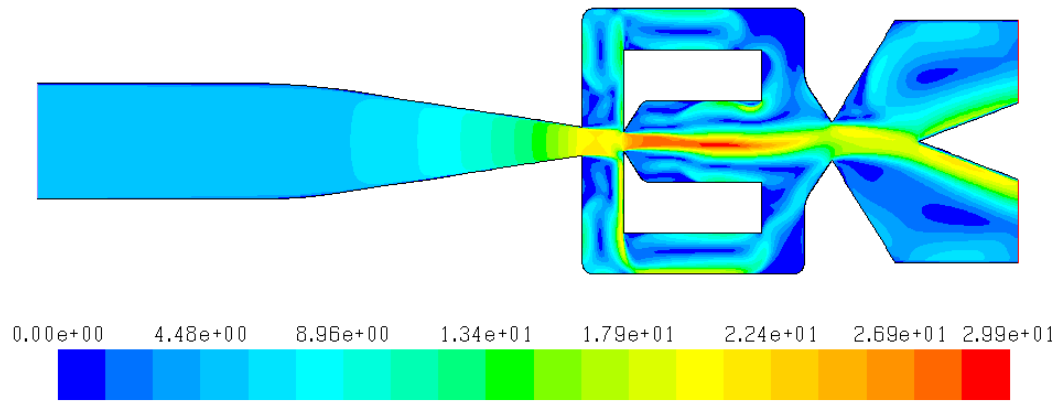


Figura 7.15: Perfil de velocidades inicial para una amplitud de la garganta de 1.75 mm

En este caso, el fenómeno que ocurría antes sucede con más intensidad. Provocando de la misma forma que no oscile.

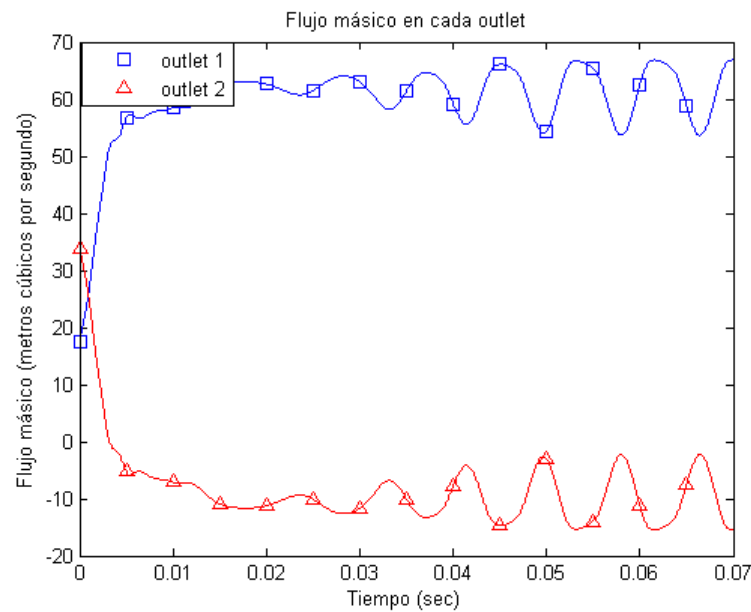


Figura 7.16: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 1.75 mm. No hay oscilaciones.

Pero ahora el flujo se separa de manera que por el outlet superior sale todo el flujo, y por el inferior se produce recirculación, de manera que el flujo entra en el oscilador.

Debido a la simetría del oscilador parece evidente que la solución opuesta,

aquella en la que el flujo sale únicamente por el outlet inferior, sea también una solución válida. El motivo por el cual hemos obtenido esta y no la otra puede deberse a la solución inicial escogida.

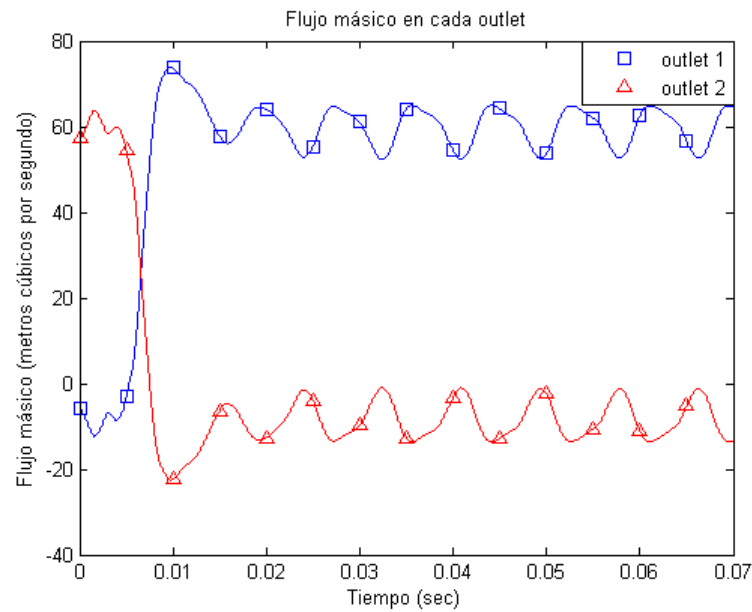


Figura 7.17: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 1.25 mm. No hay oscilaciones.

Este caso se comporta de manera muy similar al anterior. No oscila, y el outlet inferior actúa como un inlet.

Análisis de resultados

Todas las frecuencias obtenidas, incluyendo la del oscilador original se recogen en la tabla 7.2.

Amplitud [mm]	Frecuencia [Hz]	Variación[%]
5.25	0	-
4.75	74.77	+ 59.63
4.50	52.98	+ 13.12
4.25	48.83	+ 4.26
4.00	46.24	- 1.26
3.75	44.45	- 5.09
3.50	45.57	- 2.71
3.25	46.84	0
3.00	50.01	+ 6.77
2.75	58.41	+ 24.72
2.50	0	-
2.25	0	-
1.75	0	-
1.25	0	-

Tabla 7.2: Frecuencias de la modificación de la garganta de entrada a la cámara

Y se representan en la gráfica 7.18.

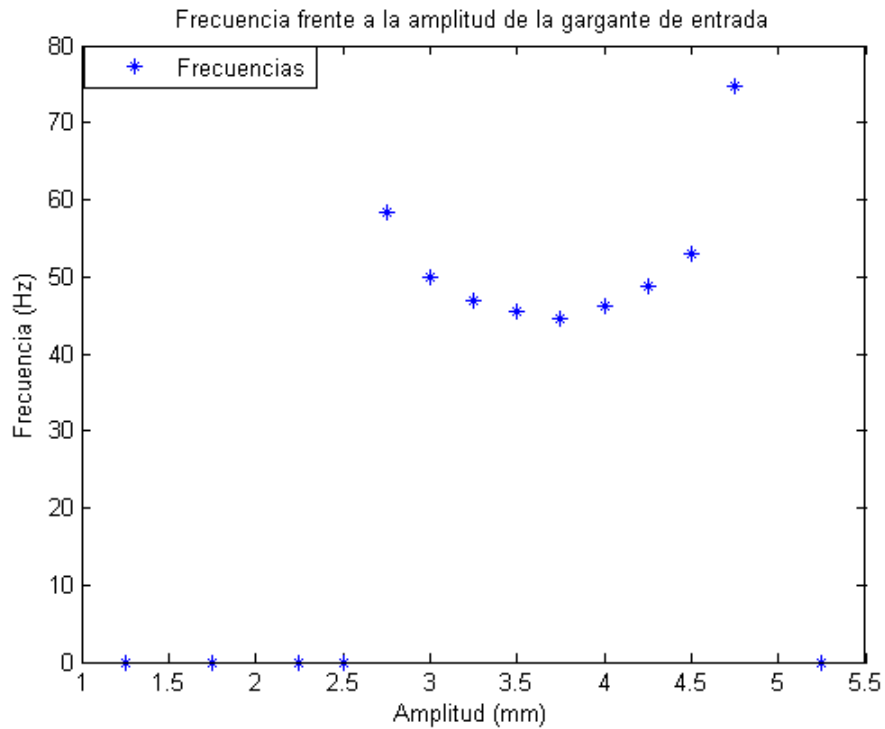


Figura 7.18: Frecuencias de la modificación de la garganta de entrada a la cámara

Podemos apreciar la forma de una parábola. El mínimo se alcanza en el valor de la amplitud de 3.75 mm.

Tal y como se predijo, la frecuencia aumenta para valores menores de la amplitud de la garganta, y disminuye para valores mayores, pero llega a un mínimo y luego vuelve a crecer, algo que no se esperaba inicialmente. Se puede deber a que como el flujo se encuentra más alejado de las paredes de la cámara, y le cuesta más adherirse. También le cuesta mucho menos desprenderse, y con poca influencia de los conductos de realimentación ya le basta para desprenderse y dirigirse hacia la pared del lado contrario.

En algunas simulaciones, aparece una pequeña perturbación antes de terminar la transición. Se puede deber seguramente a que existe una segunda frecuencia no dominante, que se manifiesta en esa fase.

Por otro lado, mirando las gráficas, se ve que en prácticamente todas el flujo másico varía entre 80 y -40 m³/s. Excepto en los dos casos extremos, en el de mayor amplitud, y en el de menor amplitud en los que todavía se producen oscilaciones, aunque en uno, acaban por desaparecer. En ellos, el flujo másico

en los outlets no llega a ser negativo, es decir no se produce flujo inverso en el outlet inactivo. Esto parece indicar que no todo el flujo pasa a través de un solo outlet, y que está a punto de dejar de oscilar. Como se comprueba en las siguientes modificaciones.

Modificación del ángulo de entrada a la cámara de mezclado

En la table 7.3 se recuerdan los diferentes cambios que se van a simular.

Modificación del ángulo [°]	Ángulo total [°]
+15	47.26
+10	42.26
+7.5	39.76
+5	37.26
+2.5	34.76
-2.5	29.76
-5	27.26
-7.5	24.76
-10	22.26
-15	17.26

Tabla 7.3: Modificaciones del ángulo de entrada a la cámara

Para este cambio, el del ángulo de entrada a la cámara, se espera, como se discute en el capítulo 4 que reducir el ángulo resulte en una disminución de la frecuencia, y en caso de aumentar el ángulo parece difícil hacer una hipótesis sobre el comportamiento.

Las gráficas resultantes de las simulaciones, igual que la sección anterior se muestran todas a continuación.

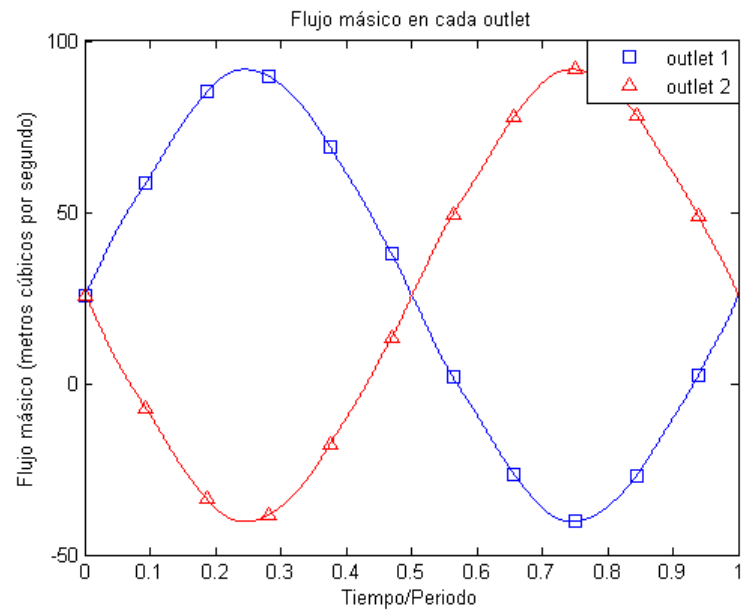


Figura 7.19: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 47.26° . La frecuencia es 47.54 Hz.

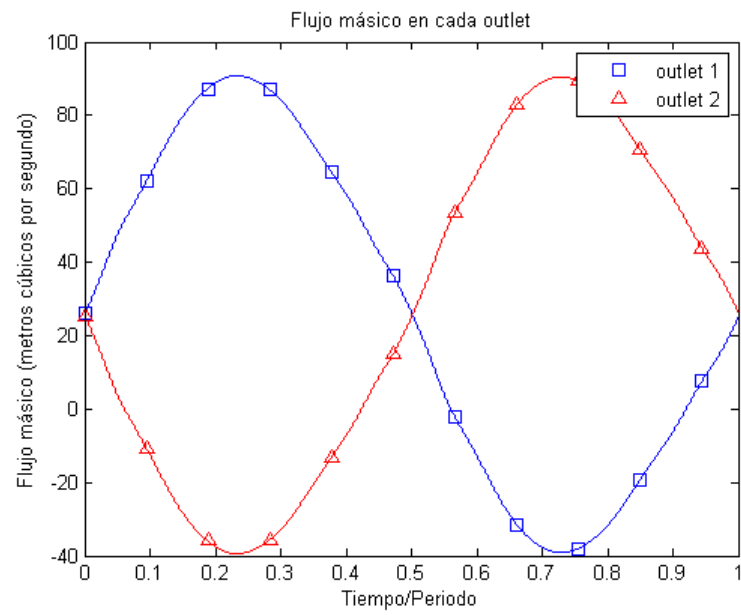


Figura 7.20: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 42.26° . La frecuencia es 47.07 Hz.

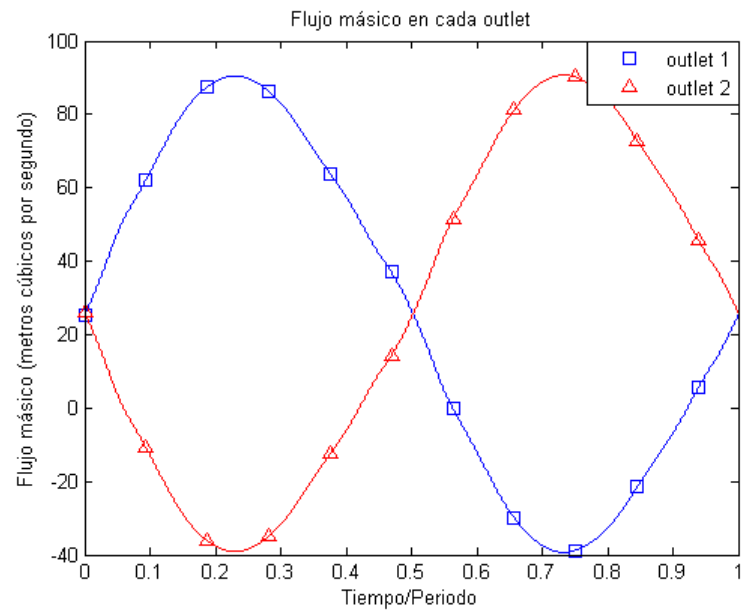


Figura 7.21: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 39.76° . La frecuencia es 47.25 Hz.

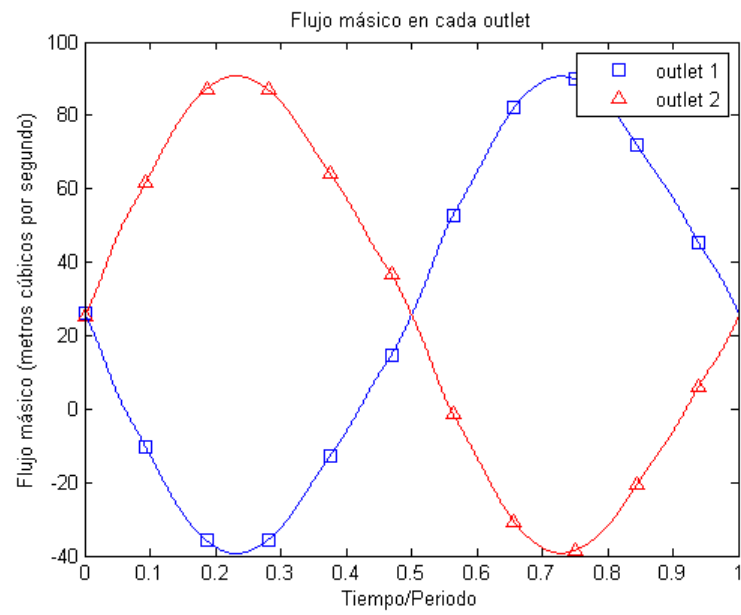


Figura 7.22: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 37.26° . La frecuencia es 46.99 Hz.

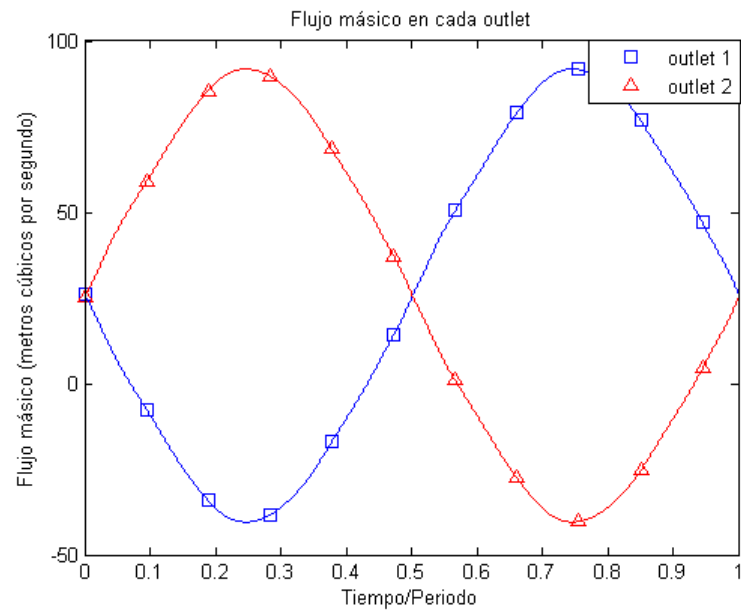


Figura 7.23: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 34.76° . La frecuencia es 47.34 Hz.

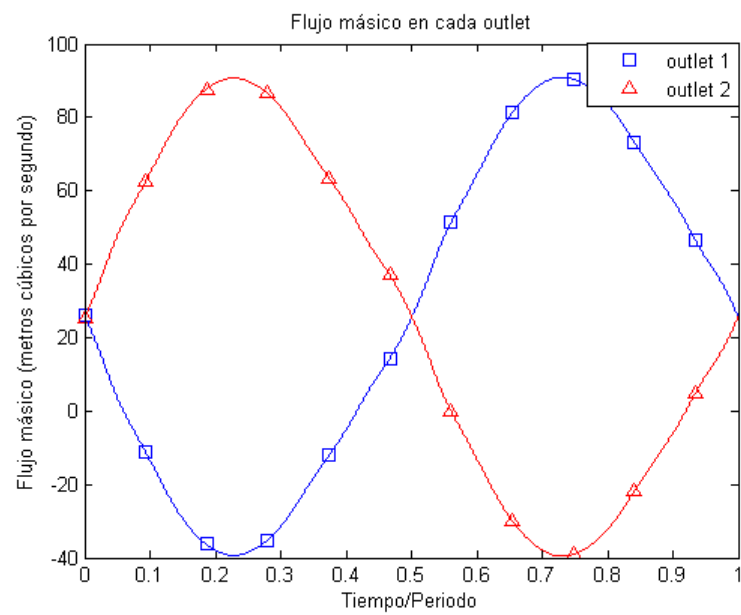


Figura 7.24: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 29.76° . La frecuencia es 46.81 Hz.

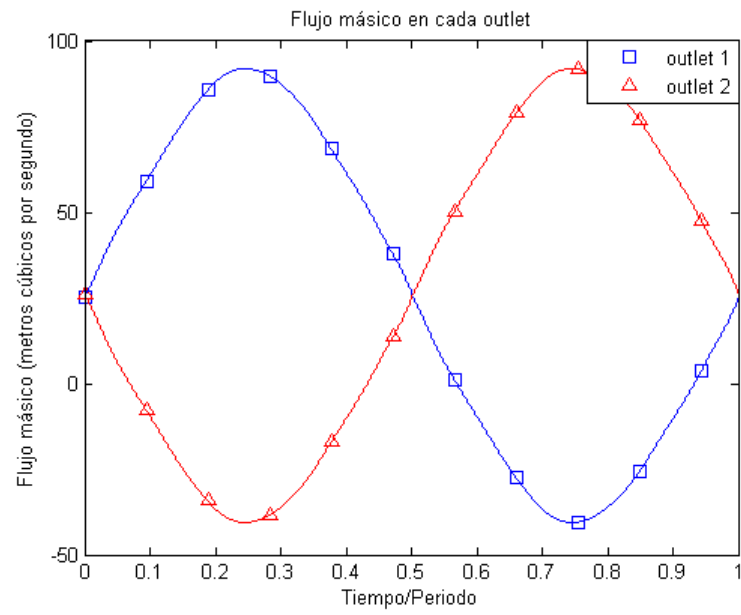


Figura 7.25: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 27.26° . La frecuencia es 46.38 Hz.

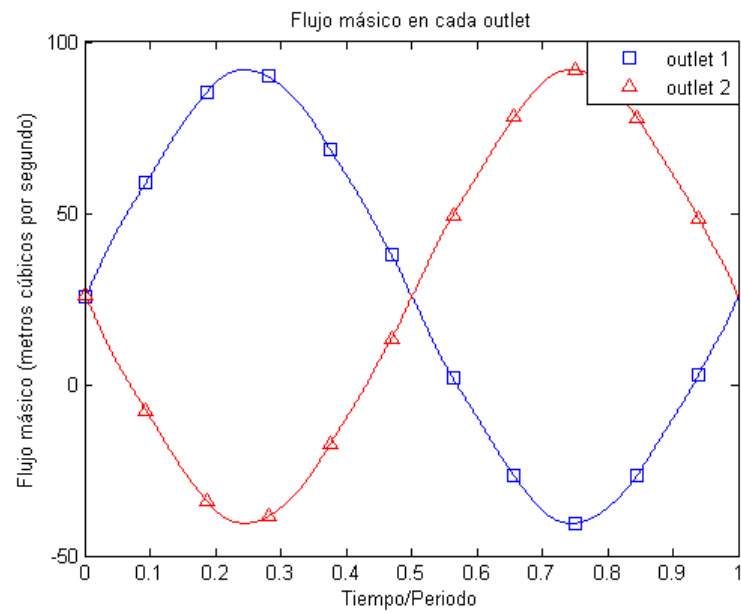


Figura 7.26: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 24.76° . La frecuencia es 46.39 Hz.

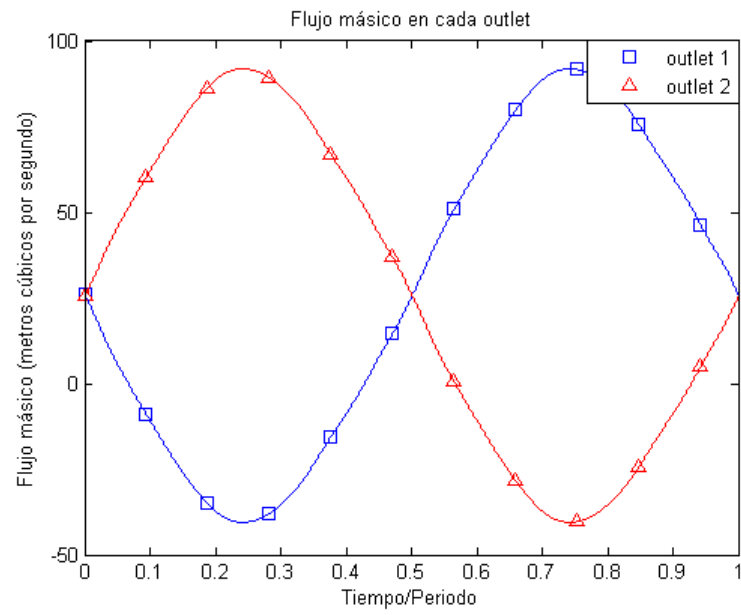


Figura 7.27: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 22.26° . La frecuencia es 47.13 Hz.

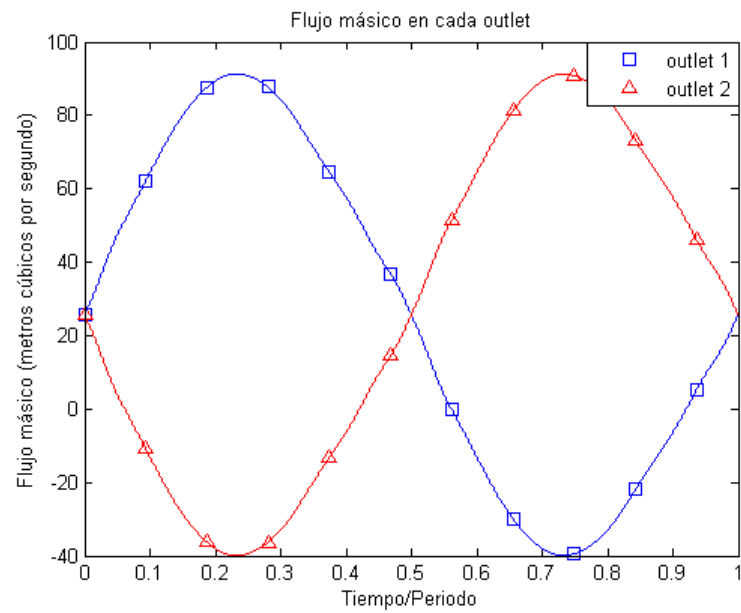


Figura 7.28: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de entrada a la cámara de 17.26° . La frecuencia es 46.62 Hz.

Análisis de resultados

Todas las frecuencias se recogen en la tabla 7.4.

Ángulo [°]	Frecuencia [Hz]	Variación [%]
47.26	47.54	+ 1.50
42.26	47.07	+ 0.50
39.76	47.25	+ 0.89
37.26	46.99	+ 0.33
34.76	47.34	+ 1.08
32.26	46.84	0
29.76	46.81	- 0.05
27.26	46.38	- 0.97
24.76	46.39	- 0.95
22.26	47.13	+ 0.63
17.26	46.26	- 0.47

Tabla 7.4: Frecuencias de la modificación del ángulo de entrada a la cámara

Y vistas la gráfica 7.29.

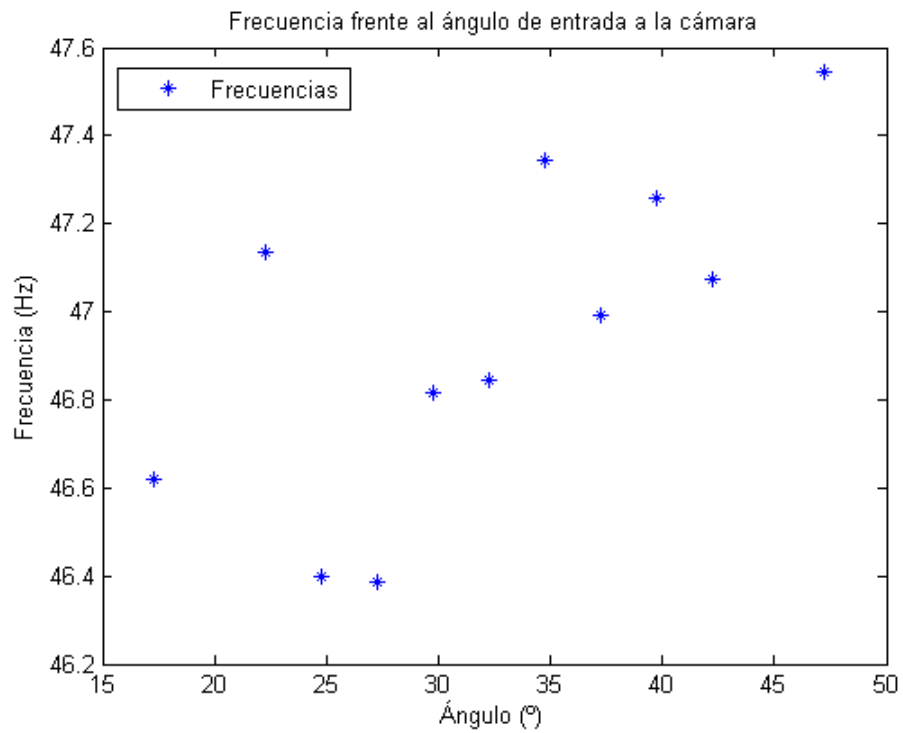


Figura 7.29: Frecuencias de la modificación del ángulo de entrada a la cámara

Puede parecer que varía mucho, pero atendiendo a los ejes se comprueba que apenas varía un Hz. Estas mismas frecuencias vistas en la gráfica 7.30 prácticamente no varían, en la que el eje y va de 40 a 55 Hz, que son los valores entre los que se encuentran la mayor parte de frecuencias del cambio de geometría anterior.

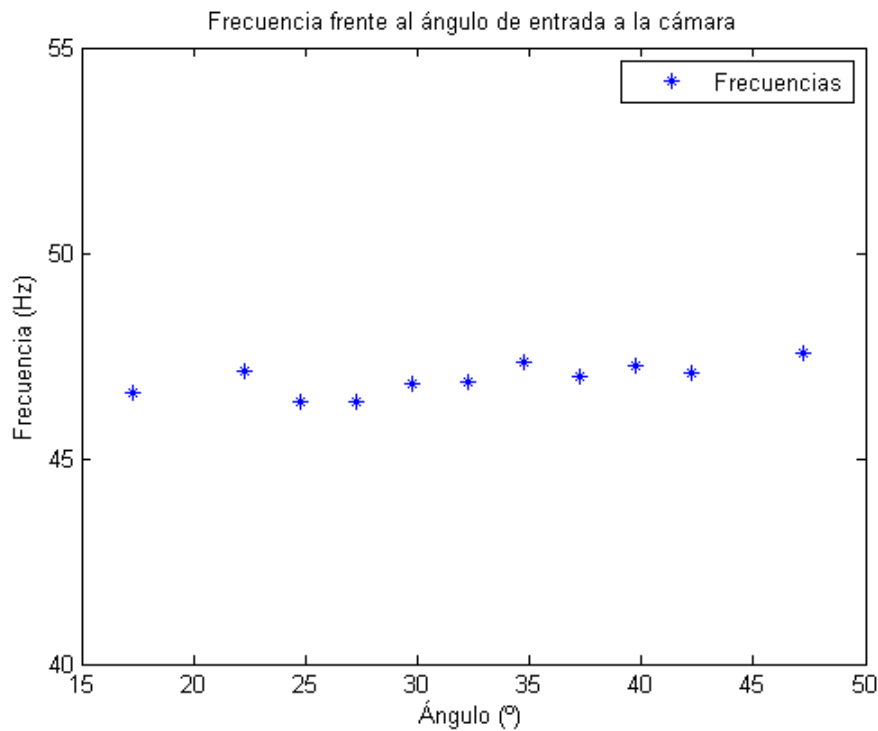


Figura 7.30: Frecuencias de la modificación del ángulo de entrada a la cámara

En este caso, el análisis es más complicado, puesto que no se aprecia ningún patrón en los cambios de frecuencia, y las gráficas de flujo másico tampoco parecen revelar nada sobre el comportamiento del oscilador.

Desde luego, el comportamiento real no se parece al que inicialmente habíamos predicho. Dado que se trata de un dispositivo complejo, el comportamiento es muy difícil de predecir. Por un lado, es cierto que la frecuencia parece que disminuye al disminuir el ángulo, pero el valor de esta disminución no es suficientemente relevante como para poder sacar ninguna conclusión. En el caso de ángulos mayores al original, el comportamiento parece que va al alza, pero igual que antes, el pequeño aumento de la frecuencia no es relevante.

Estos pequeños cambios se pueden deber a que al variar el ángulo, la burbuja de recirculación que se forma en esa zona se vea desplazada, modificando ligeramente la frecuencia. Lo único que se puede concluir, a la vista de estos resultados, es que este parámetro no parece afectar significativamente a la frecuencia de oscilación del oscilador fluídico.

Modificación de la garganta de salida de la cámara

Los cambios correspondientes a esta modificación estan en la tabla 7.5

Modificación de la amplitud [mm] (respecto a la linea de simetría)	Amplitud total [mm]
+1.00	5.40
+0.875	5.15
+0.75	4.90
+0.625	4.65
+0.50	4.40
+0.375	4.15
+0.25	3.90
-0.25	2.90
-0.50	2.40
-0.75	1.90
-1.00	1.40

Tabla 7.5: Modificaciones de la garganta de salida de la cámara

Para esta tercera modificación, la de la amplitud de la garganta de salida de la cámara, las hipótesis que se hacen en el capítulo 4, llevan a pensar que aumentar la amplitud de la garganta reducirá la frecuencia, y estrecharla, por el contrario, favorecerá las oscilaciones, pero a partir de un cierto valor, puede alterarlas.

Pues bien, una vez más las gráficas de los resultados de las simulaciones se presentan a continuación.

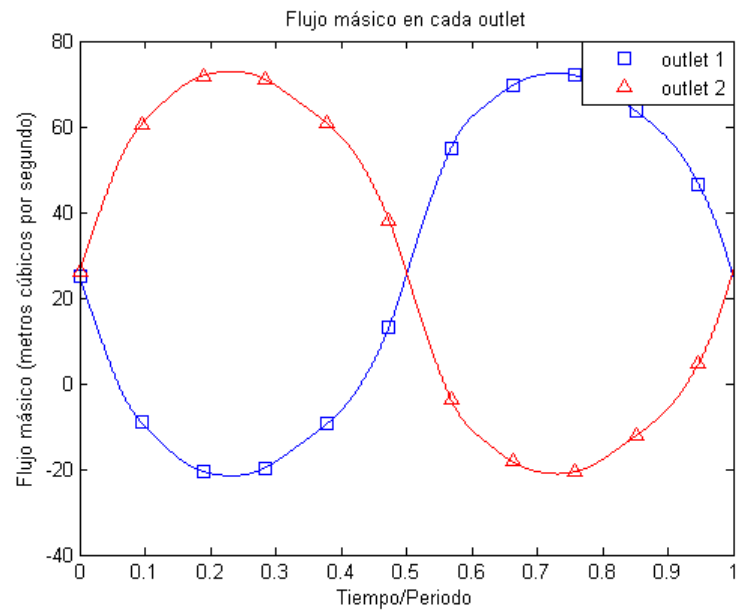


Figura 7.31: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 5.40 mm. La frecuencia es 47.44 Hz.

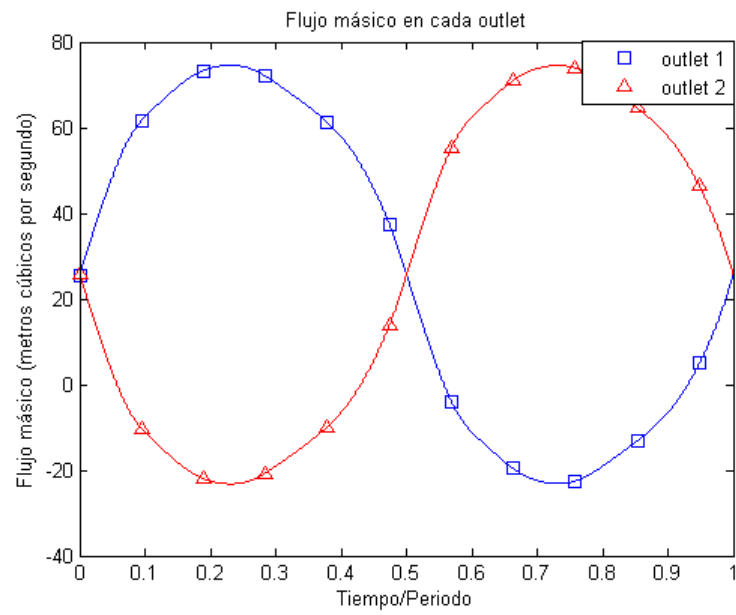


Figura 7.32: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 5.15 mm. La frecuencia es 47.31 Hz.

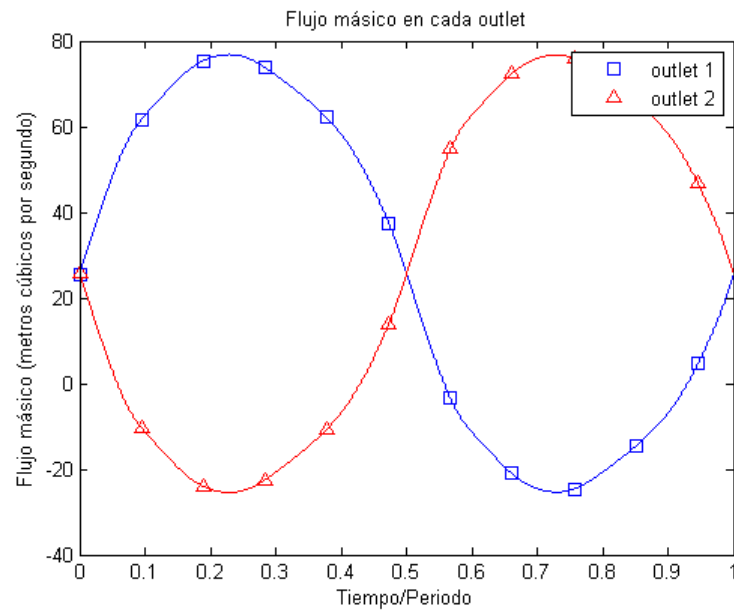


Figura 7.33: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.90 mm. La frecuencia es 47.18 Hz.

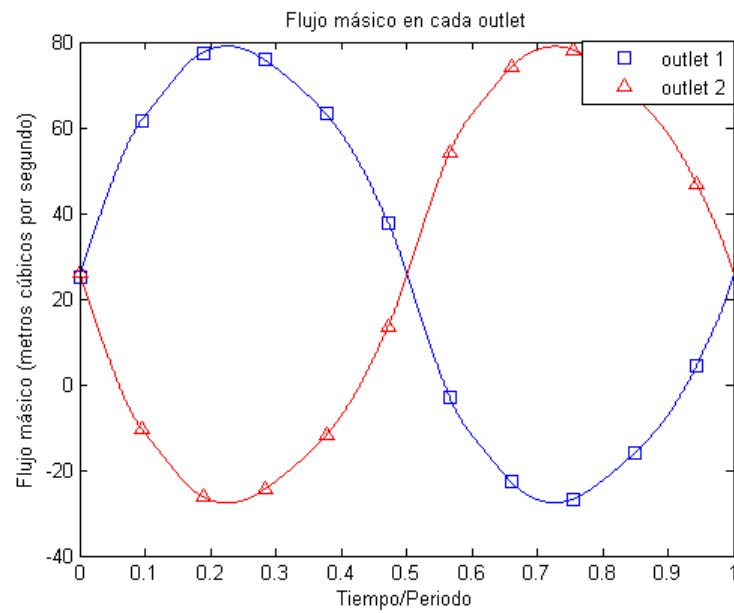


Figura 7.34: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.65 mm. La frecuencia es 46.33 Hz.

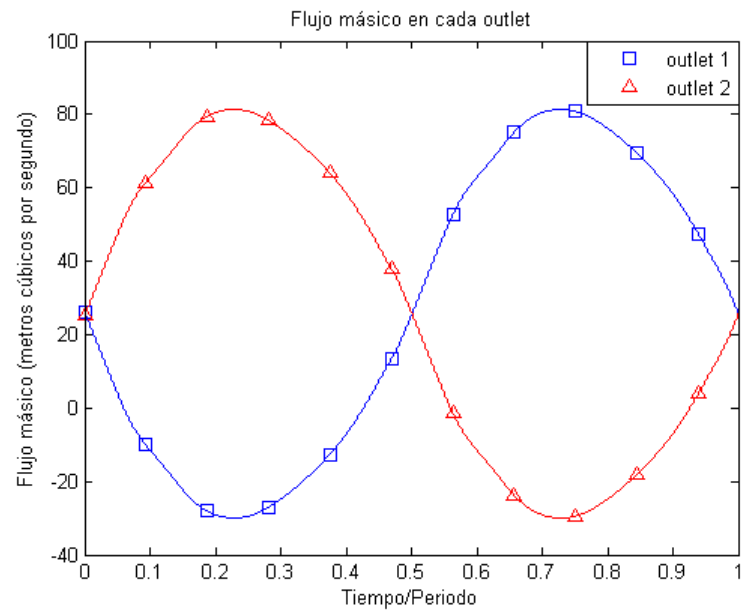


Figura 7.35: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.40 mm. La frecuencia es 46.99 Hz.

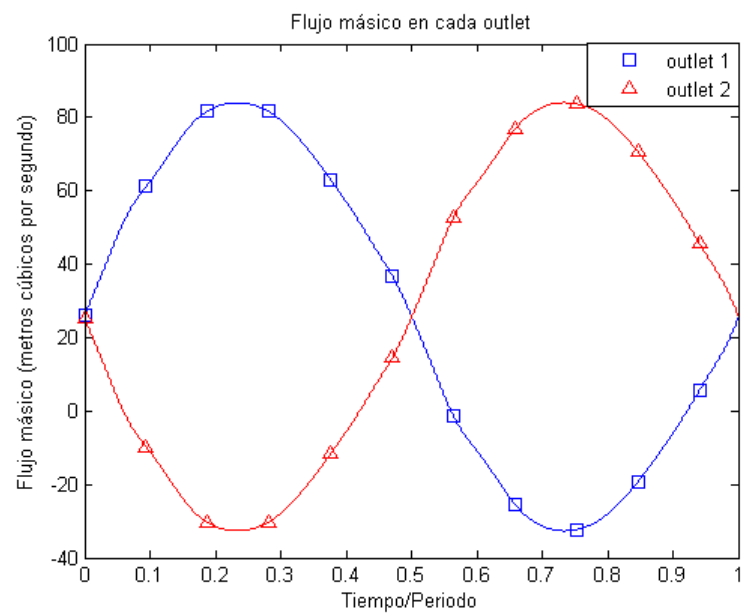


Figura 7.36: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 4.15 mm. La frecuencia es 46.78 Hz.

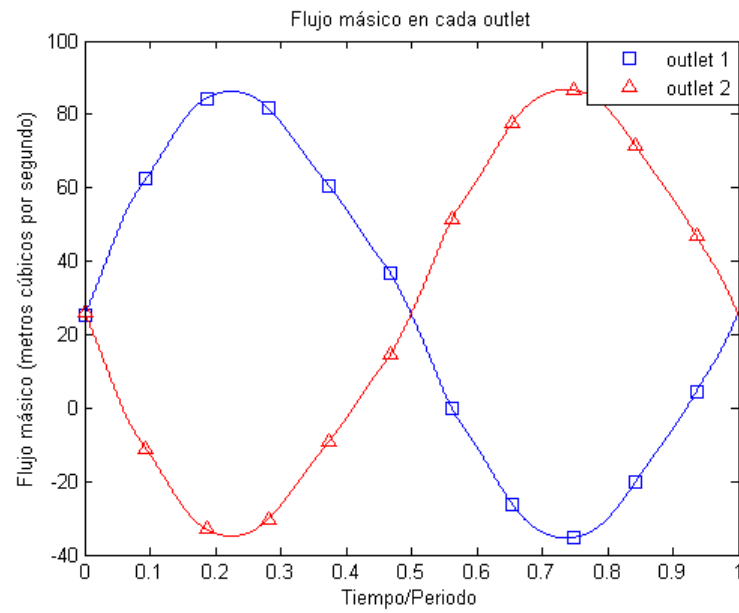


Figura 7.37: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 3.90 mm. La frecuencia es 47.30 Hz.

Oscila con una frecuencia de 47,30 Hz.

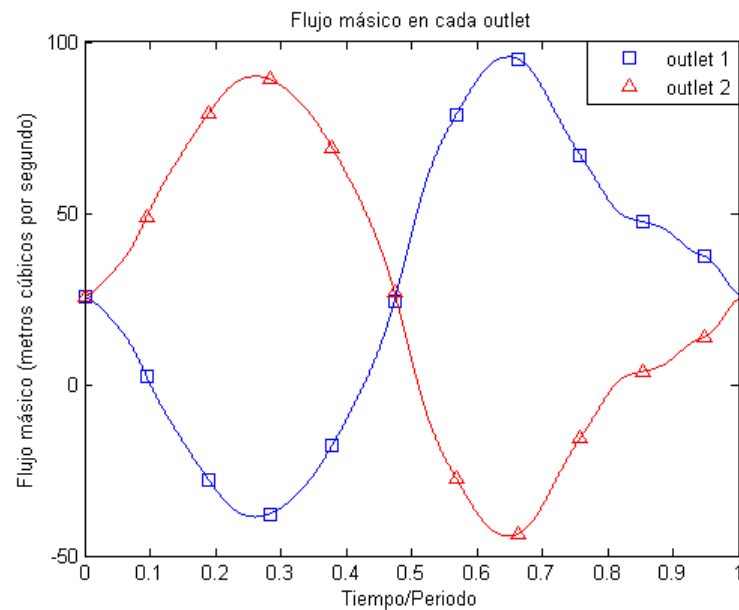


Figura 7.38: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 2.90 mm. La frecuencia es 47.21 Hz.

Para una amplitud de 2,40 mm la solución inicial, permite prever un comportamiento anómalo, dado que aguas abajo de la garganta la velocidad es

muy alta, mayor que en la cámara.

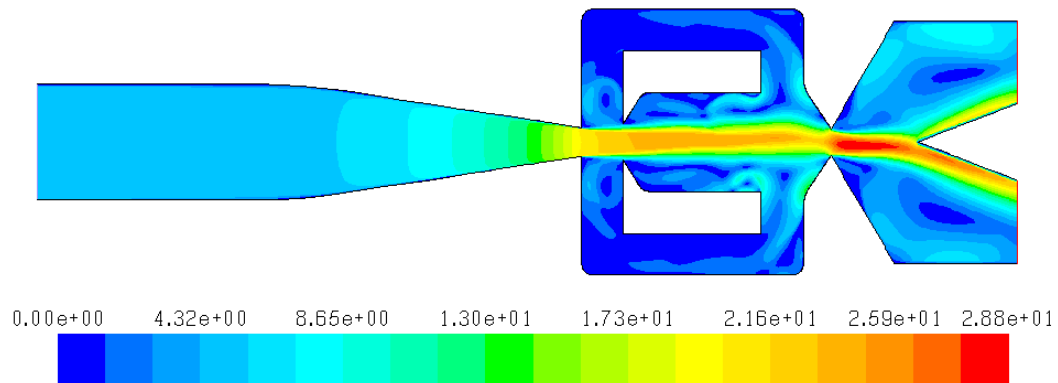


Figura 7.39: Perfil de velocidades inicial para una amplitud de la garganta de 2.40 mm

Seguramente la anomalía que aparece en la gráfica del flujo másico se deba a la alta velocidad de la salida.

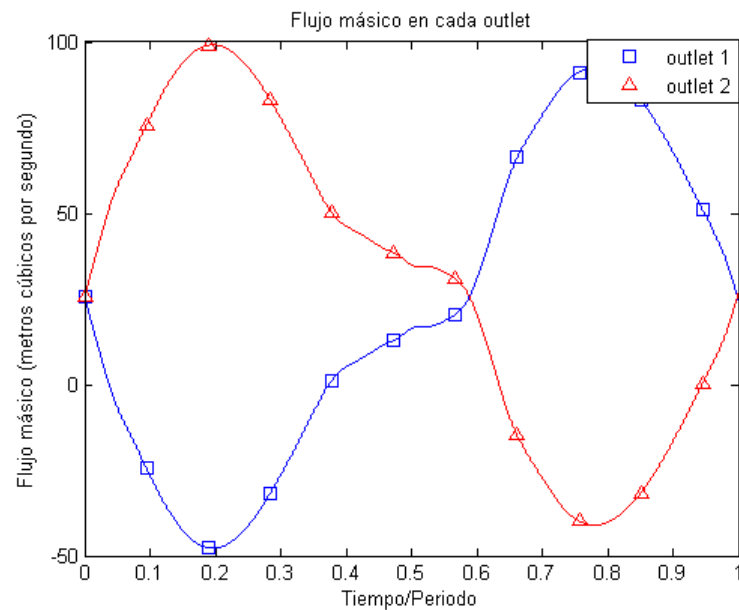


Figura 7.40: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 2.40 mm. La frecuencia es 47.28 Hz.

La aparición de esta anomalía durante la transición de una fase a la otra dificulta mucho la definición de una frecuencia, además, las transiciones no son

simétricas. Si medimos el tiempo que tarda el outlet 1 en alcanzar dos máximos consecutivos, y de ahí sacamos la frecuencia esta sería es 47.28 Hz.

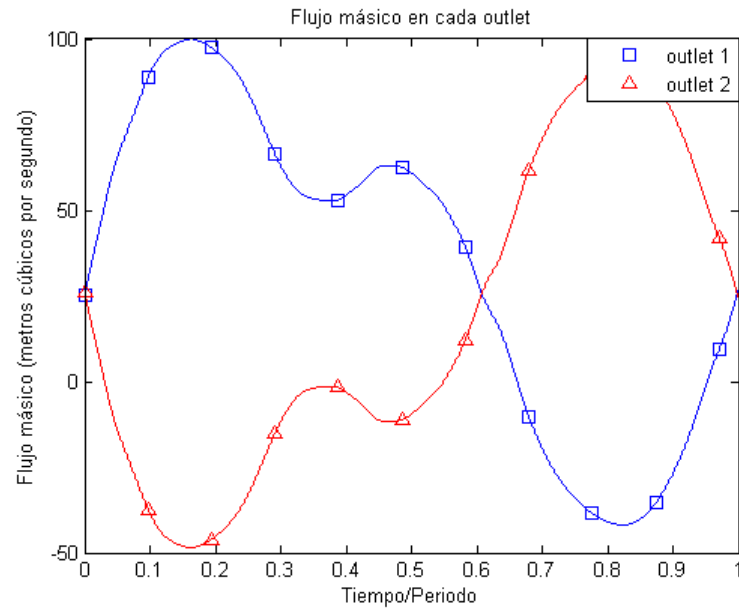


Figura 7.41: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 1.90 mm. La frecuencia es 46.02 Hz.

El fenómenos del que se habla en la figura 7.41 se observa con mayor intensidad en este caso, con una amplitud de la garganta de 1.40 mm.

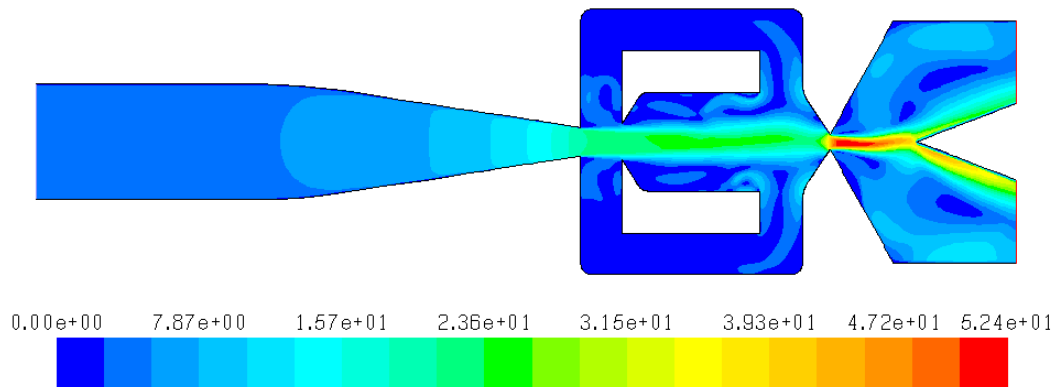


Figura 7.42: Perfil de velocidades inicial para una amplitud de la garganta de 1.40 mm

Como se puede ver, la velocidad máxima es mucho mayor que en los otros casos.

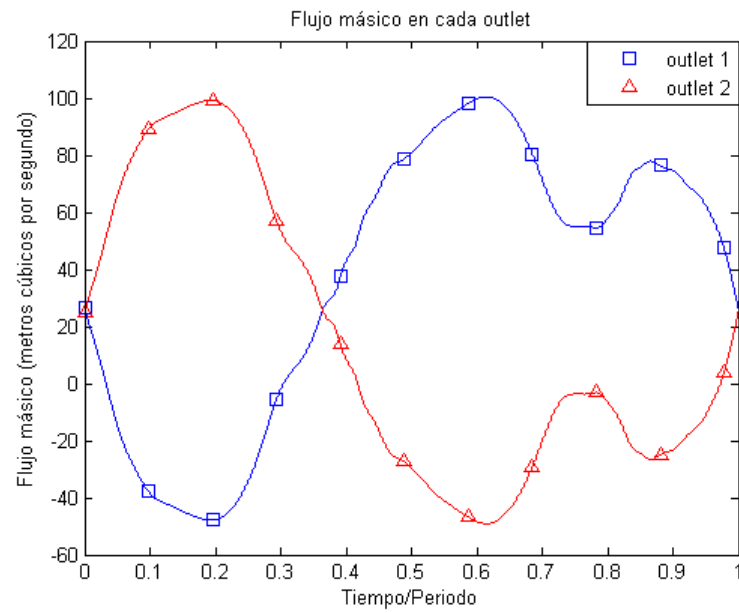


Figura 7.43: Flujo másico a través de cada outlet para una amplitud de la garganta de 1.40 mm. La frecuencia es 51.54 Hz.

Este es el caso que parece más esperpéntico. Todo parece indicar la aparición de una segunda frecuencia, es decir, no existe una frecuencia dominante, sino que existe una doble frecuencia y que ambas dominan en alguna fase de las oscilaciones..

Análisis de resultados

Las frecuencias, se presentan en la tabla 7.6.

Amplitud [mm]	Frecuencia [Hz]	Variación [%]
5.40	47.44	+ 1.28
5.15	47.31	+ 1.02
4.90	47.18	- 0.72
4.65	46.33	- 1.08
4.40	46.99	+ 0.33
4.15	46.78	- 0.13
3.90	47.30	+ 1.00
3.40	46.84	0
2.90	47.21	+ 0.80
2.40	47.28	+ 0.95
1.90	46.02	- 1.74
1.40	50.26	+ 7.31

Tabla 7.6: Frecuencias de la modificación de la garganta de salida de la cámara

Y para tomar cierta perspectiva sobre los datos en la tabla, se presentan también en la gráfica 7.44.

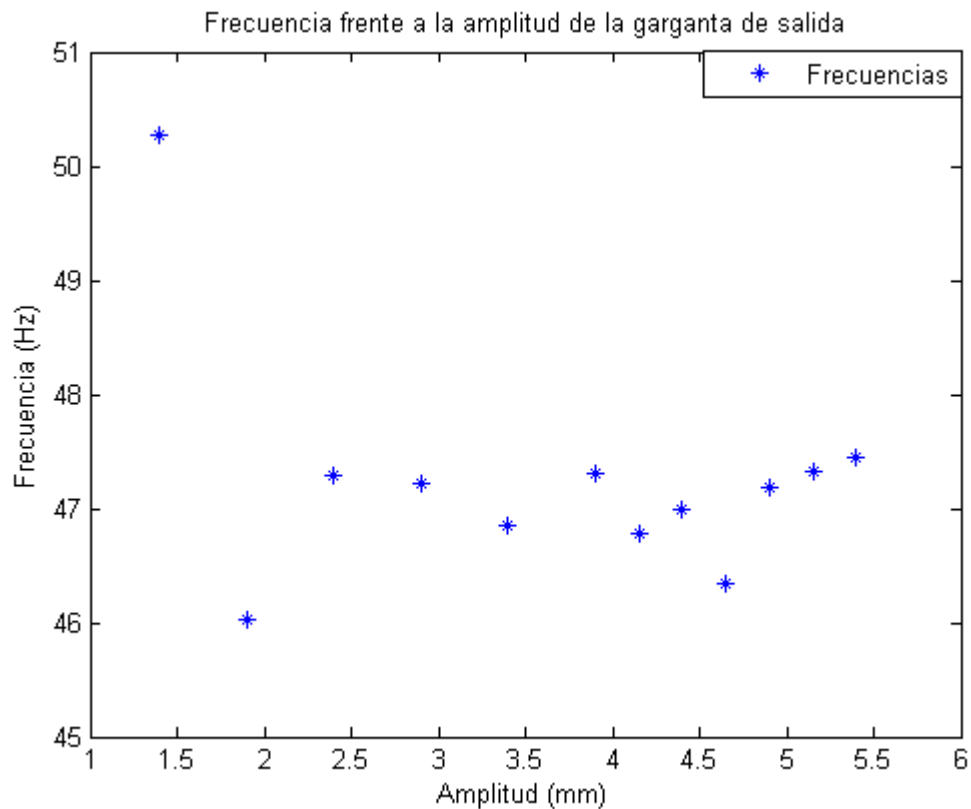


Figura 7.44: Frecuencias de la modificación de la garganta de salida de la cámara

Como se observa, la frecuencia parece bastante lineal, las variaciones no son significativas, salvo en la ultima simulación, en la que la frecuencia es algo mayor. Seguramente se deba a la aparición de la segunda frecuencia.

Se planteó hacer simulaciones para diferentes valores de la amplitud de la garganta, pero dado que en varios casos las oscilaciones no están bien definidas, y la frecuencia está siendo definida de una manera poco ortodoxa, parece que las conclusiones que se pudieran sacar de estos resultados no serían válidas.

Las hipótesis, excepto la de que estrechando la garganta aparecerá un comportamiento extraño, han resultado ser todas erróneas. Por un lado, se observa que estrechando la garganta rápidamente aparece un valor crítico, a partir del cual, las oscilaciones no tienen el mismo comportamiento que el oscilador original. Parece que surge una segunda frecuencia, que en el oscilador original no era dominante, pero debido al cambio geométrico, domina en ciertas fases de la oscilación. En el caso de aumentar la amplitud de la garganta, el comportamiento parece lineal, concretamente constante, sin grandes variaciones del

valor de la frecuencia.

A la luz de estos resultados solo se puede concluir que estrechar la garganta produce la aparición de una doble frecuencia en las oscilaciones, y sobre el comportamiento a ampliar la garganta parece que no afecta al valor de la frecuencia.

Modificación del ángulo de salida de la cámara

En la tabla 7.7 se detallan los diferentes cambios del ángulo realizado.

Modificación del ángulo [°]	Ángulo total [°]
+20	54.00
+15	49.00
+10	44.00
+5	39.00
-5	29.00
-10	24.00
-15	19.00
-20	14.00

Tabla 7.7: Modificaciones del ángulo de salida de la cámara

Para esta última modificación, las hipótesis parecían bastante claras: aumentar el ángulo producía una disminución de la frecuencia y reducirlo la aumentaba.

Después de ver los resultados se comprobará la validez de estas suposiciones.

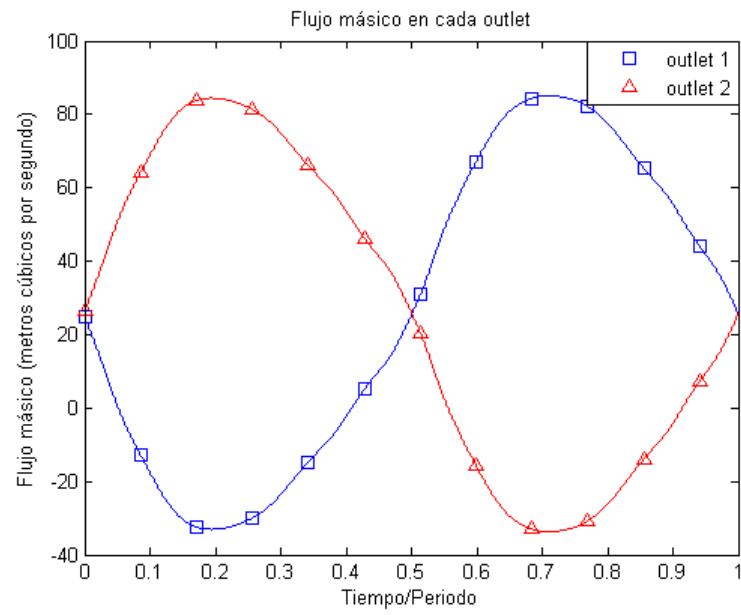


Figura 7.45: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 54.00° . La frecuencia es 42.47 Hz.

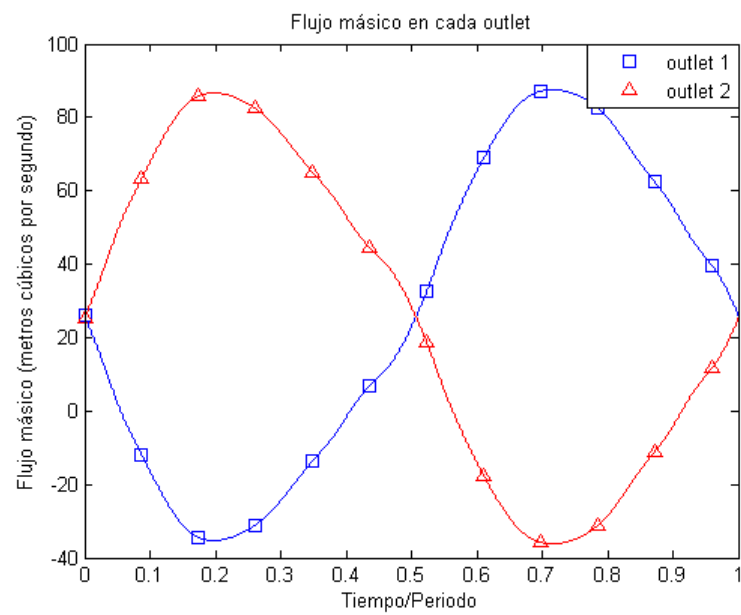


Figura 7.46: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 49.00° . La frecuencia es 44.09 Hz.

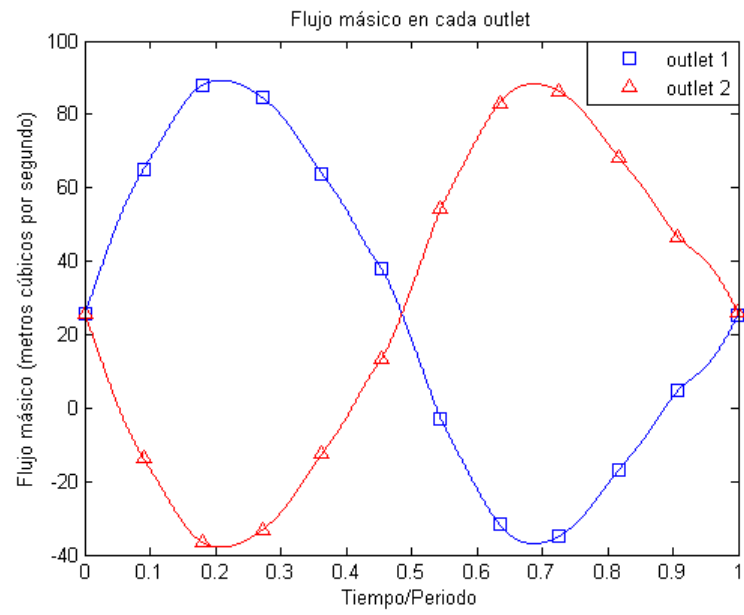


Figura 7.47: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 44.00°. La frecuencia es 44.71 Hz.

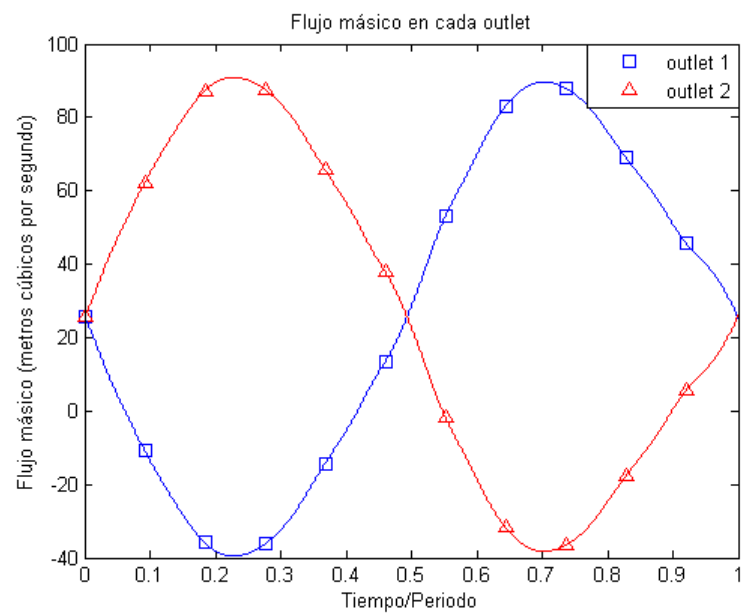


Figura 7.48: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 39.00°. La frecuencia es 45.59 Hz.

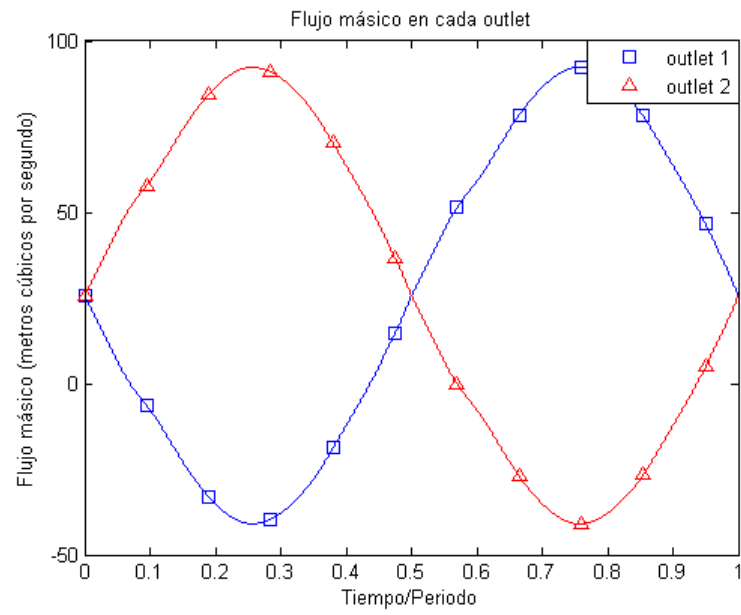


Figura 7.49: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 29.00° . La frecuencia es 47.35 Hz.

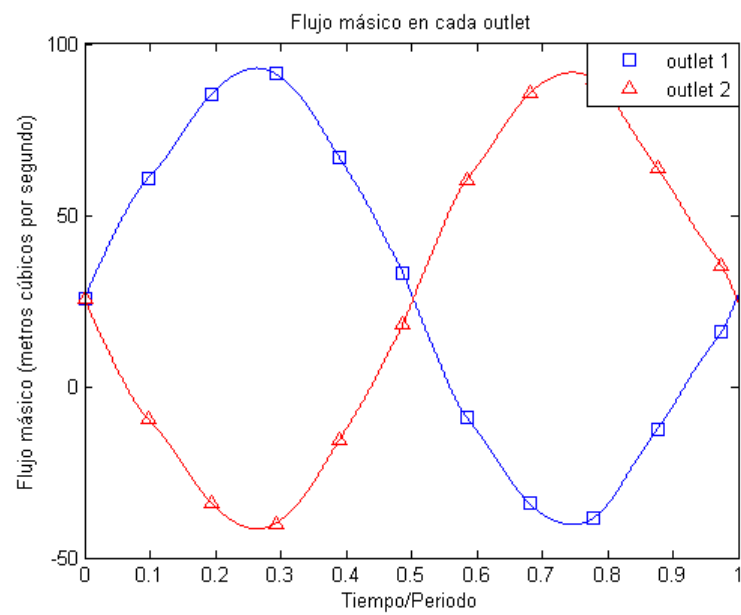


Figura 7.50: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 24.00° . La frecuencia es 48.30 Hz.

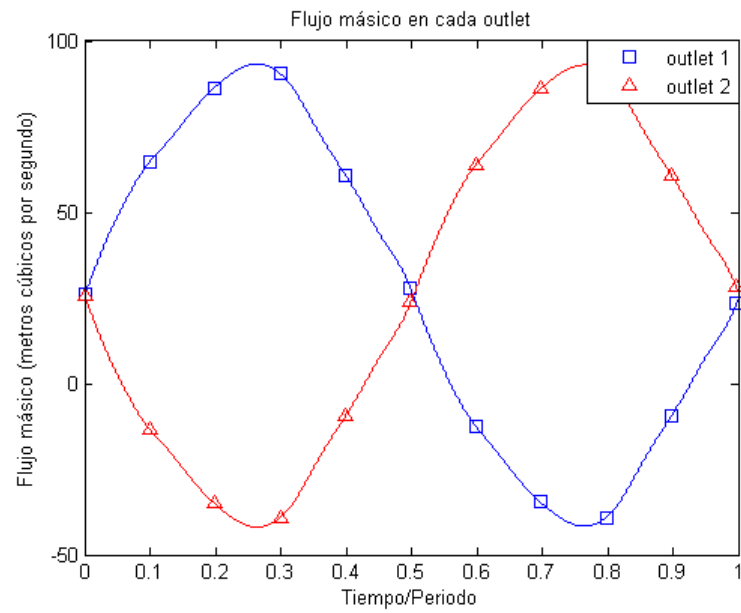


Figura 7.51: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 19.00°. La frecuencia es 49.62 Hz.

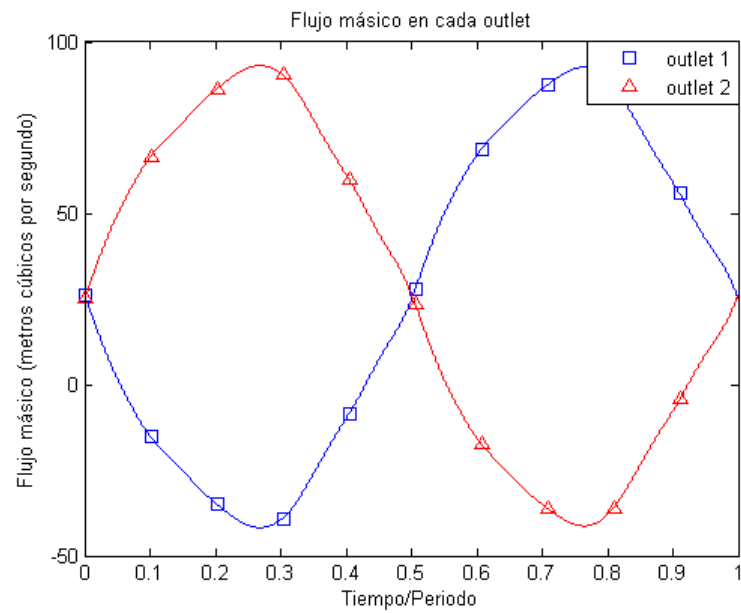


Figura 7.52: Flujo másico a través de cada outlet para un ángulo de salida de la cámara de 14.00°. La frecuencia es 50.55 Hz.

Análisis de resultados

La tabla con todas las frecuencias es la tabla 7.8.

Ángulo total [°]	Frecuencia [Hz]	Variación [%]
54.00	42.47	- 9.33
49.00	44.09	- 5.86
44.00	44.71	- 4.54
39.00	45.59	- 2.65
34.00	46.84	0
29.00	47.35	+ 1.10
24.00	48.30	+ 3.14
19.00	49.62	+ 5.95
14.00	50.55	+ 7.93

Tabla 7.8: Frecuencias de la modificación del ángulo de salida de la cámara de mezclado

Parece claro el carácter lineal de la frecuencia frente a este ángulo. Efectivamente se comprueba en la gráfica 7.53.

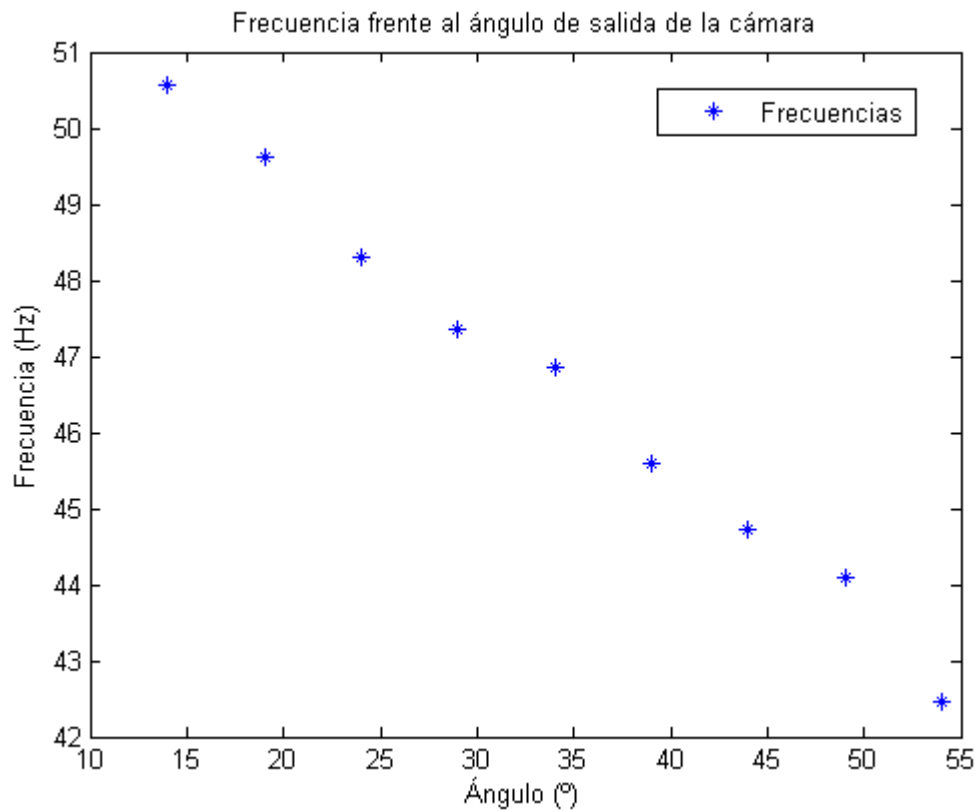


Figura 7.53: Frecuencias de la modificación del ángulo de salida de la cámara de mezclado

Mediante una regresión lineal es posible obtener la ecuación de la recta que nos permitirá predecir la frecuencia con obtendremos con un futuro cambio de geometría de este parámetro. Teniendo en cuenta siempre que esto es un sistema físico, no matemático, y que por tanto habrá valores del ángulo a partir del cual el sistema no responda con este comportamiento.

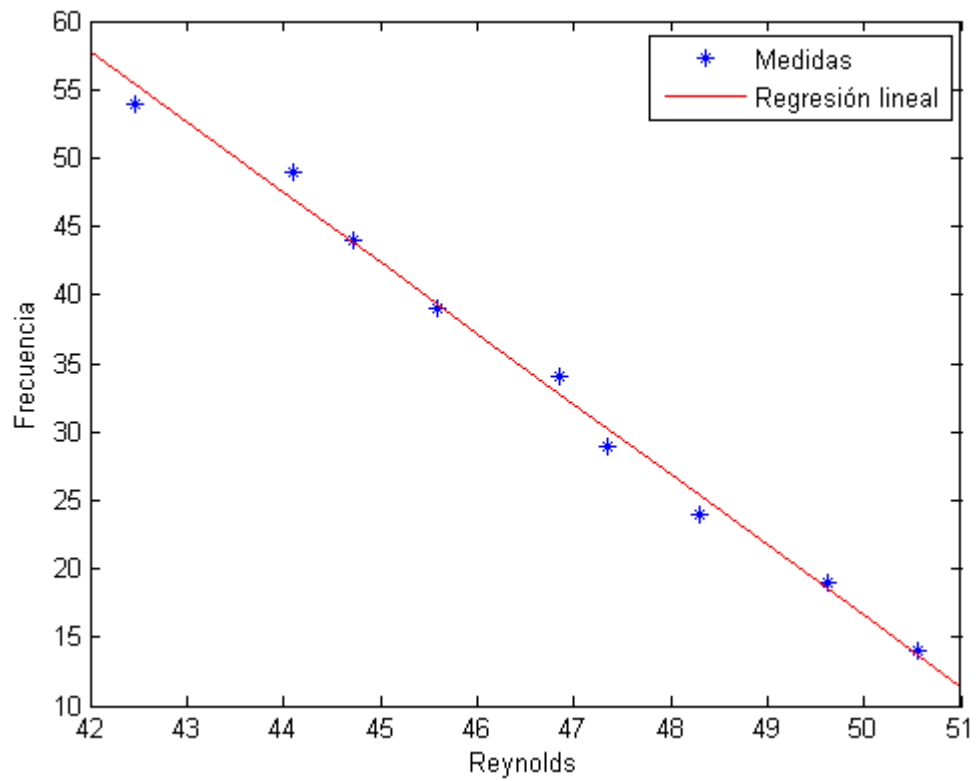


Figura 7.54: Frecuencias de la modificación del ángulo de salida de la cámara de mezclado

El coeficiente de determinación es $R^2 = 0,9928$, lo que indica el fuerte carácter lineal que ya se aprecia en la gráfica, y la ecuación viene dada por $y = -5,1466x + 273,93$

Así pues, efectivamente, las hipótesis en este caso se prueban ciertas.

Capítulo 8

Conclusiones

Al realizar este estudio, se pretendía conocer el comportamiento de un oscilador fluídico frente a cambios de geometría y, al mismo tiempo, entender, un poco más el comportamiento interno y las características del flujo que atraviesa este oscilador.

Con este pretexto, se han analizado varios estudios tanto experimentales como numéricos realizados con anterioridad, en la Technische Universitat Berlin, y en la propia ETSEIAT, durante la realización del proyecto final de carrera de Mikel Ruiz Arozarena, con el mismo oscilador fluídico. Además se ha hecho uso de los programas ANSYS Icem y ANSYS Fluent, dos programas de amplia utilización en el sector de Computational Fluid Dynamics (CFD).

Durante el presente estudio se realizaron cuatro cambios geométricos, los cuales, una vez estudiado el funcionamiento de las oscilaciones y el recorrido interno del fluido, teóricamente, parecían determinantes para la generación de dichas oscilaciones.

Del primer cambio geométrico realizado, el de la amplitud de la garganta de entrada a la cámara de mezclado, se concluye que efectivamente, parece ser un parámetro geométrico determinante en el valor frecuencia de las oscilaciones. Por un lado, agrandar o estrechar en gran medida la amplitud de la garganta, desemboca en la desaparición de las oscilaciones. En el caso de estrecharla demasiado, se debe a que el flujo principal es incapaz de atravesar la garganta en su totalidad, y es dirigido hacia los conductos de realimentación, impidiendo que estos cumplan su función natural. En el otro caso, el de agrandar la garganta, el flujo pasa muy alejado de las paredes de la cámara de mezclado, impidiendo que se produzca el efecto Coanda, un fenómeno clave

en la aparición de las oscilaciones. Para los valores en los que si se producen oscilaciones, hay que destacar que hay unos valores críticos de la amplitud de la garganta, justo antes de que desaparezcan las oscilaciones, en los que se produce un aumento muy significativo de la frecuencia, y además no se produce el fenómeno de flujo inverso en el outlet inactivo. Para el resto de valores intermedios, la variación de la frecuencia no es tan significativa, pero si apreciable. La frecuencia en función de la amplitud de la garganta parece tener forma de parábola, alcanzando un valor mínimo, y dos máximos relativos, justo antes de dejar de oscilar. Así pues de este cambio se puede decir que es una modificación sorprendente, y que presenta un comportamiento, que a priori, no era de esperar.

De la segunda modificación, la del ángulo de entrada a la cámara de mezclado, se concluye que parece ser un cambio menos destacable, pero no por ello menos interesante. A la hora de conseguir un oscilador con una frecuencia diferente, no parece un cambio interesante. Sí que es cierto que parece que conforme se aumenta el ángulo aumenta la frecuencia de las oscilaciones, pero no de una manera significativa. Además se produce un comportamiento difícil de explicar, ya que el valor de la frecuencia es poco sensible al valor del ángulo, y no parece presentar una respuesta continua. Una posible explicación de estos pequeños cambios de frecuencia puede ser que al variar el ángulo, la burbuja de recirculación que allí se produce es desplazada arriba o abajo, modificando ligeramente la frecuencia. Un estudio más exhaustivo de este parámetro podría arrojar luz sobre el verdadero comportamiento interior del oscilador.

En cuanto al tercer cambio, el de la garganta de salida de la cámara de mezclado, se puede concluir que es un parámetro que no afecta en gran medida al valor de la frecuencia, pero sí produce otros fenómenos interesantes. Cuando se estrecha la garganta lo suficiente, aparece una doble frecuencia, que en los casos en los que la garganta no es suficientemente estrecha, acaba por desaparecer, ya que la primera frecuencia domina. Pero en el caso en el que la garganta es más estrecha, parece que esta segunda frecuencia se vuelve también dominante en una fase distinta, de manera que ambas son co-dominantes. Además el valor de la frecuencia principal aumenta. En el caso de ampliar la anchura de la garganta, parece que la frecuencia permanece constante, sin apenas cambios significativos.

De la cuarta y última modificación, la del ángulo de la garganta de salida

de la cámara de mezclado, se puede concluir que es un cambio que incide de manera directa en el valor de la frecuencia. Conforme se aumenta el ángulo disminuye la frecuencia de forma lineal. Parece ser la modificación más interesante si lo que se quiere es obtener un oscilador con una frecuencia diferente para un flujo másico determinando. Aunque, como es obvio, para valores más extremos de los ángulos no tendrá ese comportamiento lineal.

Para comprender bien el alcance de estos resultados es necesario percatarse de que estos cambios no son tan sólo de la amplitud de una garganta o del valor de un ángulo, sino que lo que se ha desplazado en el oscilador son las diferentes paredes, es decir, estos valores de la amplitud de las garganta y de los ángulos podían haberse conseguido desplazando otras paredes, y quizá, darían lugar a frecuencias diferentes.

Capítulo 9

Presupuesto

En este capítulo se presenta el coste de todos los conceptos requeridos para la elaboración de este trabajo. Se ha detallado de manera que si interesa realizar este estudio o alguno similar en algún otro momento y alguno de los costes de los conceptos que se detallan en la tabla 9.1 ha cambiado se pueda estimar el precio del estudio modificando el valor de ese coste.

Mano de obra			
	Horas	Precio por hora €/hora	Precio total €
Estudiante	300	12	3600
Software			
	Unidades	Precio por unidad €/año	Precio total €
Licencias ANSYS	1	1700	1700
Licencia Matlab	1	2000	2000
Licencia Office	1	79.99	79.99
Costes indirectos (15 %)			
			Precio total €
Electricidad + material de oficina			1106.99

Tabla 9.1: Presupuestos del estudio detallados

Hay que considerar que si ya se dispone de las licencias, el coste del estudio se reduce a 4140 €.

Capítulo 10

Impacto medioambiental

En el impacto medioambiental hay que tener en cuenta dos aspectos clave.

Elaboración del trabajo

En esta sección hay que considerar la energía que ha consumido el ordenador que se ha usado para la elaboración y redacción del trabajo. Además, hay que añadir la gran cantidad de energía que se ha consumido al realizar todas las simulaciones que se han hecho en el clúster, y sus correspondientes emisiones.

Aplicaciones del trabajo

Pero por otro lado, los osciladores fluídicos sirven, entre otras posibles aplicaciones, para aumentar la eficiencia de las cámaras de combustión, modificando la mezcla estequiométrica de combustible y fluido, y en un futuro, este estudio, y todos los que se están llevando a cabo sobre este tema podrían repercutir en la implantación de los osciladores fluídicos en las alas de los aviones, reduciendo el drag, aumentando el lift y reduciendo el peso del avión y por lo tanto, reduciendo la cantidad de combustible que estos consumen. De manera que aunque actualmente el impacto medioambiental sea negativo, en un futuro, este podría ser muy positivo, reduciendo las emisiones.

Capítulo 11

Trabajo futuro

Dado que el tema de estudio de este trabajo es un dispositivo novedoso que se está estudiando en la actualidad, sería muy interesante que nuevos proyectistas decidieran continuar el trabajo aquí realizado.

Por eso, debido al conocimiento acumulado del oscilador fluídico durante el trabajo final de grado, es posible realizar recomendaciones sobre futuros trabajos que se podrían realizar sobre este dispositivo. En cuanto a trabajos relacionados con los cambios geométricos, desde la experiencia adquirida, hay varias modificaciones que parecen interesantes. El primero es la longitud de los conductos de realimentación. Estos conductos parecen tener una influencia importantísima en la aparición de las oscilaciones. Alargarlos, y hacer así que el fluido tenga que recorrer una mayor distancia aguas arriba para incidir en el flujo principal debería traducirse en una disminución de la frecuencia. De la misma forma, acortarlos produciría un aumento de la misma. La segunda modificación está muy relacionada con la primera: el grosor de los conductos de realimentación. Parece que si se estrechan transportarán menos flujo aguas arriba y por lo tanto la frecuencia disminuirá, de la misma forma que agrandarlos aumentará la frecuencia. Además hay un elemento del oscilador que parece tener poca influencia sobre las oscilaciones, es el desviador que separa los dos outlets, de manera que sería interesante ver si realmente no tiene ninguna influencia en la frecuencia, ampliando, reduciendo e incluso quitándolo. Por otra parte, sería también interesante realizar más simulaciones a número de Reynolds más bajo, y ver el verdadero comportamiento de la gráfica Reynolds frente a frecuencia, ya que parece que no es del todo lineal. Por último, dejando de lado los cambios geométricos, sería muy interesante hacer el modelado en

tres dimensiones, y ver las discrepancias con los resultados aquí obtenidos.

Bibliografía

- [1] Raghu S. Fluidic oscillator for flow control. *Experiments in Fluids*. 2013.
- [2] Bobusch BC, Woszidlo R, Bergada JM, Nayeri CN, Paschereit CO. Experimental study of the internal flow structures inside a fluidic oscillator. *Experiments in Fluids*. 2013.
- [3] Bobusch B, Bergada JM, Nayeri CN, Paschereit CO. performance analysis of a fluidic oscillator for flow control applications.
- [4] Gokoglu SA, Kuczmarski MA, Dennis EC, Raghu S. Numerical Studies of a supersonic fluidic diverter actuator for flow control. *AIAA Journal*. 2010, October.
- [5] Arozarena MR. Estudio de los osciladores fluídicos mediante mecánica de gfluidos computacional. *Proyecto final de carrera ETSEIAT* 2014, diciembre.
- [6] Hobbs EV, Harry Diamond Labs Adelphi MD. Fluid Amplification. 9. Logic Elements. 08 MAR 1963
- [7] Raman G, Packiarajan S, Papadopoulos G, Weissman C, Raghu S. Jet thrust vectoring using a miniature fluidic oscillator. *Aeronautical Journal* 2005, vol.109, No. 1093, pp. 129-138.
- [8] Poinso T, Candel S, Esposito E, Lang W, Bourienne F. Suppression of combustion instabilities by active control. *Journal of Propulsion and Power*. 1989, vol.5, No. 1, pp. 14-20.
- [9] Raman G, Raghu S. Cavity resonance suppression using miniature fluidic oscillators. *AIAA Journal*. 2004, December, vol. 42, No. 12, pp. 2608-2612,

- [10] Cerretelli C, Kirtley K. Boundary layer separation control with fluidic oscillators. *Journal of Turbomachinery*. 2009.
- [11] Seele R, Tewes P, Woszidlo R, McVeigh A, Lucas NJ, Wygnanski IJ. Discrete sweeping jets as tools for improving the performance of the V-22. *Journal of Aircraft*. 2009.
- [12] Seifert A, Stalnov O, Sperber D, Arwatz G, Palei V, David S, Dayan S, Fono I. Large trucks drag reduction using active flow control. *Tel Aviv University internal report*.
- [13] Raghu, S. *Method and apparatus for aerodynamic flow control using compact high-frequency fluidic actuator arrays*. US Patent 8,382,043. Google Patents. 2013-Feb-26.
- [14] Guyot D, Paschereit CO, Raghu S. Active combustion control using a fluidic oscillator for asymmetric fuel flow modulation. *Int J Flow Control*. 2009.
- [15] Bobusch B. Experimentelle und numerische Bestimmung der Innendurchströmung eines fluidischen Oszillators. *Diplomarbeit*. 2010.
- [16] Arbeláez D, Lopez OD. Comparación de diferentes modelos de turbulencia en aplicaciones aerodinámicas. *VIII congreso colombiano de métodos numéricos*. 2011.